



UNIVERSIDAD DE GRANADA

Teledetección en sistemas costeros: Detección de la línea de costa en morfologías deltaicas

Sandra Paola Viaña Borja

Supervisado por Dr. Miguel Ortega Sánchez

Programa de doctorado en Dinámica de los Flujos
Biogeoquímicos y sus Aplicaciones

Instituto Interuniversitario de Investigación del Sis-
tema Tierra en Andalucía (IISTA)

Universidad de Granada

Febrero, 2020

Disertación para aspirar al grado de Doctora.

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Sandra Paola Viaña Borja
ISBN: 978-84-1306-531-1
URI: <http://hdl.handle.net/10481/62910>

*A mi familia,
tanto la de consanguinidad, como la elegida.*

Acknowledgements

Como mujer, no tengo patria.

Como mujer, no quiero patria.

*Como mujer, mi patria es el
mundo entero.*

Virginia Woolf.

Está llegando a su fin un ciclo muy importante en mi vida, cuando terminé la carrera no habría podido imaginar estar recibiendo el mayor título académico en un país extranjero. Durante la última década, mi vida ha sido una completa montaña rusa, enseñándome a ser un poco más flexible e ir acoplándome a lo que ella me presentaba. Llegué en el 2007 a España, con la simple ilusión de experimentar, conocer otras culturas distintas a la mía, pero sin expectativas pre-establecidas, nunca llegué a pensar que Granada se convertiría en mi segundo hogar y que tendría una gran familia elegida en estas tierras.

No soy de muchas palabras y pienso que siempre quedarán muchas personas fuera que merecen también mi agradecimiento. A todas las personas que han sido parte de mi vida durante esta experiencia, extendiendo mis infinitas GRACIAS!

Empezaré por agradecer al Ministerio de Educación (Colombia) y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Colombia), antiguamente el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) porque sin la beca concedida por ellos, esta investigación no habría sido posible.

Al grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, al Plan Propio de Investigación y al Programa de Unidades de Excelencia, de la Universidad de Granada, por su financiación para asistir al congreso internacional para la comunicación de la investigación, y la publicación en una de las revistas de mayor impacto en el tema.

A Miguel Ortega Sánchez, que ha confiado en mi, me ha guiado a través de un tema del cual yo no tenía ninguna idea cuando inicié este proyecto. Por su claridad para ver las cosas y capacidad para ayudarme a organizar ideas dentro de mi propio caos mental. Gracias por tus consejos y revisiones. Admiro tu practicidad y la tranquilidad que me transmitiste muchas veces sin saberlo. Gracias!

Agradezco a mi familia, mis padres, mis hermanos y hermanas, por el apoyo brindado estos años para la exitosa culminación de este gran proyecto. Sobre todo mi hermana Karen, sin sus tiquetes aéreos para darme un respiro y visitarlos, habría sido más complicado aún, je je je.

A Maira por ser completamente incondicional, ser mi familia, mi apoyo, mi coaching, durante estos años, siempre has estado allí apoyándome y creyendo en mí, sin ti, creo que me habría dado por vencida hace mucho tiempo. Siempre daré gracias por tenerte en mi vida.

A Nahia y María por estar siempre ahí y los momentos de esparcimiento compartidos, por haber aceptado a esta Colombiana que no es de *letras*, en su familia. Por su generosidad al recibirme en su hogar cada vez que lo necesitaba, sobre todo durante el último año del doctorado. Y Nahia, gracias por tu paciencia para lidiar mis constantes cambios de estados de ánimo, producto del estrés y preocupación, en su mayor parte.

Sigo con el resto de mis amistades cercanas que me han regalado una sonrisa, una agradable conversación, una palabra de aliento, un abrazo, o sencillamente su cariño. Gracias Adry, Lorena, Fer, Luis, Belkys, John Freddy, Sonia V, Belén, Irene, Priscila, Carmen, Charo. Y también a aquellas personas que he conocido de forma intermitente, aunque no aparezcan aquí sus nombres. Cada una ha dejado huella.

Gracias a todxs!

Abstract

Deltas are complex sedimentary formations of great importance, both because of the interaction of the river and marine processes that converge in them, and because of their extensive biodiversity. This has made such areas desirable targets for the development of different types of socio-economic activities, as well as home to a very high percentage of the world's population. However, they constitute one of the most vulnerable ecosystems to complex processes such as subsidization or relative sea level rise due to global warming. Therefore, for an adequate present and future management, it is necessary to have the tools and the necessary knowledge that will allow to plan and carry out effective and sustainable measures in these areas.

The research presented in this Doctoral Thesis proposes an automatic methodology using an algorithm that allows the detection of the coastline in deltaic environments from medium resolution satellite images. The images have been acquired through one of the free access databases of the National Aeronautics and Space Administration of the United States (NASA). To assess the goodness of the methodology, images from the Landsat project were used, from which three of the sensors used on the different satellites of the project were selected. This made it possible to use a large amount of data over a wide time range.

As a preliminary step for the approach and design of the methodology, a review and analysis has been carried out in which the basic concepts related to electromagnetic theory and remote sensing are clarified. In addition, the basic parameters required to select the appropriate remote sensing technique according to the proposed objective are discussed in depth. In this way, the role that each parameter plays in the selection of the ideal technique according to the limitations of the research is highlighted.

Once the concepts were clear and after analyzing each of the basic parameters according to the objectives and limitations highlighted, and based on previous studies related to the detection of coastline, two spectral indices

were proposed based on the spectral analysis of the different study areas selected. In this regard, no evidence was found in the literature to show that the proposed indices have been used previously for the same objective proposed in this research.

In order to evaluate the goodness of the proposed methodology, a statistical comparison was made between the results obtained using the proposed indices, and those obtained from other spectral indices commonly used in the literature to detect bodies of water. This comparison was made by applying each of the indices to three deltas of the Spanish Mediterranean (deltas of the rivers Guadalfeo, Adra and Ebro), which were selected, among other things, for being subject to microtidal conditions and for having climatic and morphological similarities. The results concluded that the methodology with one of the indices proposed in this Doctoral Thesis presented remarkable advantages in terms of efficiency and precision over the most commonly used indices for the detection of coastlines, thus contributing to the expansion of knowledge related to spectral indices in these areas of study.

Resumen

Los deltas son formaciones sedimentarias complejas de gran importancia, tanto por la interacción de los procesos fluviales y marinos que confluyen en ellos, como por su extensa biodiversidad. Esto ha hecho que tales zonas sean objetivos deseables para el desarrollo de diferentes tipos de actividades socio-económicas, así como el hogar de un porcentaje muy elevado de la población mundial. Sin embargo, constituyen uno de los ecosistemas más vulnerables a procesos complejos como la subsidencia o el aumento relativo del nivel del mar por efecto del calentamiento global. Por ello, para una adecuada gestión presente y futura es necesario disponer de las herramientas y el conocimiento necesario que permitan plantear y llevar a cabo medidas eficaces y sostenibles en estas zonas.

En la investigación que se presenta en esta Tesis Doctoral se plantea una metodología automática mediante un algoritmo que permite detectar de la línea de costa en entornos deltaicos a partir de imágenes satelitales de mediana resolución. Las imágenes han sido adquiridas a través de una de las bases de datos de libre acceso de la administración nacional de aeronáutica y espacio de los Estados Unidos (NASA). Para evaluar la bondad metodológica se utilizaron imágenes del proyecto Landsat, del cual se seleccionaron tres de los sensores que se utilizan en los diferentes satélites del proyecto. Ello permitió aprovechar una gran cantidad de datos enmarcados en un amplio rango temporal.

Como paso previo para el planteamiento y diseño de la metodología, se ha realizado una revisión y análisis en los que se aclaran los conceptos básicos relacionados con la teoría electromagnética y la teledetección. Además, se profundiza en los parámetros básicos requeridos para seleccionar la técnica de teledetección apropiada según el objetivo planteado. De esta forma se pone de manifiesto el papel que cada parámetro juega en la selección de la técnica idónea de acuerdo a las limitaciones de la investigación.

Una vez se han tenido claros los conceptos y tras analizar cada uno de los parámetros básicos de acuerdo a los objetivos y limitaciones remarcadas,

y con base en estudios previos relacionados con la detección de línea de costa, se propusieron dos índices espectrales basados en el análisis espectral de las distintas zonas de estudio seleccionadas. Al respecto, no se encontró evidencias en la literatura que muestren que los índices planteados hayan sido utilizados anteriormente para el mismo objetivo propuesto en esta investigación.

Con el fin de evaluar la bondad de la metodología propuesta, se realizó una comparación estadística entre los resultados obtenidos utilizando los índices planteados, y aquellos conseguidos a partir de otros índices espectrales comúnmente utilizados en la literatura para detectar cuerpos de agua. Esta comparación se hizo aplicando cada uno de los índices sobre tres deltas del mediterráneo Español (deltas de los ríos Guadalfeo, Adra y Ebro), los cuales fueron seleccionados, entre otras cosas, por estar sometidos a condiciones micro-mareales y por tener semejanzas climáticas y morfológicas. Los resultados concluyeron que la metodología con uno de los índices propuestos en esta Tesis Doctoral presentó ventajas destacables en cuanto a la eficacia y precisión sobre los índices más utilizados para la detección de línea de costa, contribuyendo de esta manera a la ampliación del conocimiento relacionado con los índices espectrales en estas área de estudio.

Índice General

1	Introducción	1
1.1	Zonas costeras y su importancia	1
1.2	Zonas Deltaicas	2
1.3	Teledetección	5
1.3.1	Proyecto Landsat	7
1.4	Objetivos	9
1.5	Estructura de la Tesis	10
1.6	Publicaciones derivadas de la tesis doctoral	10
1.6.1	Artículos Científicos Indexados	10
1.6.2	Artículos Científicos en Preparación	10
1.6.3	Conferencias Internacionales	11
1.6.4	Conferencias Nacionales	11
2	Teledetección	13
2.1	Definición	13
2.2	Historia	14
2.3	Marco Conceptual	16
2.3.1	Funcionamiento Básico de cualquier Sistema de Detección Remota	16
2.3.2	La Energía Electromagnética y sus Principios Básicos	18

2.3.3	Interacción de la Energía en la Atmósfera y/o Superficie Terrestre	21
2.3.4	El Espectro Electromagnético y su Influencia en Teledetección	22
2.4	Aplicaciones	24
3	Cómo escoger un sistema de Teledetección	29
3.1	Objeto de Estudio	31
3.2	Tipo de Sensor	33
3.3	Tipo de Dato Originado	35
3.4	Tipos de Plataforma	36
3.5	Tipo de Resolución	37
3.6	Adquisición	38
4	Zonas de Estudio y Datos	45
4.1	Descripción de las Zonas de Estudio	45
4.1.1	Delta del Río Guadalfeo	46
4.1.2	Delta del Río Adra	48
4.1.3	Delta del Río Ebro	50
4.2	Descripción de los Datos Utilizados	51
4.2.1	Imágenes Satelitales Multiespectrales - Proyecto Landsat	51
4.2.2	Datos de Alta Resolución	57
5	Nuevo Índice Espectral	59
5.1	Antecedentes de los Índices Espectrales	59
5.2	Propuesta de los Nuevos Índices Espectrales	63
6	Detección de la Línea de Costa	73
6.1	Introducción	73
6.2	Pre-procesamiento	75
6.3	Procesamiento	78
6.4	Post-procesamiento	80
6.5	Validación de los Datos	80
6.6	Indicador de Línea de costa	82

7 Resultados y Discusión	83
7.1 Delta del Guadalfeo	84
7.1.1 Análisis de la precisión	90
7.2 Delta del Adra	94
7.2.1 Análisis de la precisión	98
7.3 Delta del Ebro	101
7.3.1 Análisis de la precisión	109
7.4 Discusión de los Resultados	111
8 Conclusiones	115
8.1 Conclusiones	115
8.2 Futuras Líneas de Investigación	122
Appendix A GUI - Procesamiento de las Imágenes	123
Appendix B Errores calculados en las líneas de costa extraídas	139
Referencias	147

Índice de Figuras

1.1	Línea de costa en distintas fechas que muestra la evolución del delta del Guadalfeo en los últimos 20 años.	3
1.2	Imágenes del satélite Sentinel-1 antes y después de la borrasca "Gloria" en el delta del Ebro.	4
2.1	Línea de tiempo	15
2.2	Analogía entre la teledetección y el registro de información humana a través de los sentidos.	17
2.3	Explicación esquemática del proceso de teledetección.	17
2.4	Esquema del Espectro Electromagnético. Tomado del tutorial online "Principios de Teledetección". Por Liew, S.C. 1997. Universidad Nacional de Singapur.	23
2.4	Distintas aplicaciones de la teledetección	27
2.5	Aplicaciones en el área de estudios costeros	28
3.1	Parámetros básicos en teledetección antes de iniciar cualquier estudio.	30
3.2	Firma espectral de una muestra de agua en una zona paralela a la costa oeste de Estados Unidos. Tomado de la Librería en línea de datos espectrales de USGS. Por Kokaly, R.F. et al. 2017. Geological Survey Data Series.	32

3.3	Firma espectral de una muestra de agua en mar abierto en el océano Atlántico, al este de los Estados Unidos. Tomado de la Librería en línea de datos espectrales de USGS. Por Kokaly, R.F. et al. 2017. Geological Survey Data Series.	32
3.4	Esquema básico de clasificación de sensores utilizados en teledetección.	34
3.5	Clasificación de algunos sensores pasivos	42
3.6	Clasificación de algunos sensores activos	43
4.1	Mapa de localización del delta del Guadalfeo.	48
4.2	Mapa de localización del delta del Adra.	49
4.3	Mapa de localización del delta del Ebro.	50
4.4	Distribución de las imágenes seleccionadas por fecha y sensor para cada zona de estudio.	56
5.1	Media y desviación estándar de las firmas espectrales de las principales coberturas analizadas en el delta del Guadalfeo para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.	65
5.2	Media y desviación estándar de las firmas espectrales de las principales coberturas analizadas en el delta del Adra para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.	66
5.3	Media y desviación estándar de las firmas espectrales de las principales coberturas analizadas en el delta del Ebro para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.	67
5.4	Media y desviación estándar de los índices espectrales analizados analizadas en el delta del Guadalfeo para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.	69
5.5	Media y desviación estándar de los índices espectrales analizados en el delta del Adra para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.	70
5.6	Media y desviación estándar de los índices espectrales analizados en el delta del Ebro para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.	70

6.1	Distribución de las imágenes seleccionadas por fecha y sensor para cada zona de estudio.	74
6.2	Secuencia del procesamiento de las imágenes para obtener la línea de costa. Ejemplo aplicado a la imagen obtenida el 18 de noviembre de 2014.	81
7.1	Indices calculados en imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Guadalfeo.	86
7.2	Línea de costa extraídas de imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Guadalfeo.	87
7.3	Comparativa de localización de invernaderos en la llanura del delta del Guadalfeo. La figura (a) muestra los invernaderos detectados con el índice WI2 en una imagen capturada por el sensor OLI el 12 de Septiembre de 2013, que coinciden con los encontrados en la figure (b) de una imagen de Google del 31 de Diciembre de 2013. Imagen reproducida con autorización de Viaña-Borja, S.P y Ortega-Sánchez, M., <i>Remote Sensing MDPI Journal</i> , 2019	88
7.4	Ejemplo de algunos errores detectados después de aplicar la metodología a las imágenes seleccionadas en el delta del río Guadalfeo.	89
7.5	Gráficas de las distancias verticales con sus respectivos valores medios y desviación estándar, entre la línea de costa a partir de las imágenes Landsat y los datos de alta resolución, en la zona del Guadalfeo.	92
7.6	Indices calculados en imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Adra.	96
7.7	Línea de costa extraídas de imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Adra.	98
7.8	Ejemplo de algunos errores detectados después de aplicar la metodología a las imágenes seleccionadas en el delta del río Adra. Cada una de las subfiguras muestra el resultado de extraer la línea de costa de la imagen Landsat TM del 25 de Julio de 2001 a partir de los distintos índices espectrales.	99

7.9	Gráficas de las distancias verticales con sus respectivos valores medios y desviación estándar, entre la línea de costa a partir de las imágenes Landsat y los datos de alta resolución, en la zona del Adra.	100
7.10	Indices calculados en imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Ebro.	104
7.11	Línea de costa extraídas de imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Ebro.	107
7.12	Ejemplo de algunos errores detectados después de aplicar la metodología a las imágenes seleccionadas en el delta del río Ebro con los distintos índices evaluados.	108
7.13	Gráficas de las distancias verticales con sus respectivos valores medios y desviación estándar, entre la línea de costa a partir de las imágenes Landsat y los datos de alta resolución, en la zona del Ebro.	111
A.1	Interfaz Gráfica para el Procesamiento de las Imágenes utilizando Índices Espectrales.	123

Índice de Tablas

4.1	Especificaciones técnicas de los sensores utilizados para obtener las imágenes de la investigación.	52
4.2	Set de imágenes analizadas.	55
4.3	Fechas de adquisición de los datos utilizados para la validación de la metodología.	57
5.1	Algunos de los índices utilizados para detección de cuerpos de agua a partir de imágenes multiespectrales. ρ indica valores de número digital (DN) o de reflectancia en las distintas bandas propuestas para cada índice.	61
5.2	Distribución del número de muestra representativa de acuerdo a la zona de estudio y tipo de sensor.	64
7.1	Número de imágenes en donde se detectó correctamente la línea de costa, sin ruidos apreciables después de aplicar la metodología propuesta con los diferentes índices evaluados en el delta del río Guadalfeo.	90
7.2	Número de imágenes en donde se detectó correctamente la línea de costa, sin ruidos apreciables después de aplicar la metodología propuesta con los diferentes índices evaluados en el delta del río Adra.	96
7.3	Número de imágenes en donde se detectó correctamente la línea de costa, sin ruidos apreciables después de aplicar la metodología propuesta con los diferentes índices evaluados en el delta del río Ebro.	109

B.1	Comparación (Media \pm Desviación Estándar) entre las imágenes Landsat analizadas y los datos GPS / Ortofotos de alta resolución en el delta del río Guadalfeo.	140
B.2	Comparación (Media \pm Desviación Estándar) entre las imágenes Landsat analizadas y los datos de alta resolución (ortofotos) en el delta del río Adra.	142
B.3	Comparación (Media \pm Desviación Estándar) entre las imágenes Landsat analizadas y los datos de alta resolución (ortofotos) en el delta del río Ebro.	144

Lista de Abreviaturas

AWEI índice de extracción automática de agua	8
CNIG centro nacional de información geográfica	58
DN número digital	35
DGPS sistema de posicionamiento global diferencial	57
DOS sustracción de objetos oscuros	77
EM espectro electromagnético	22
EROS <i>earth resources observation system program</i>	16
ERS <i>European remote sensing satellites</i>	16
ERTS-1 <i>earth resources technology satellite</i>	16
ETM+ <i>enhanced thematic mapper plus</i>	53
IRS <i>Indian remote sensing satellite program</i>	16
JERS <i>Japan earth resources satellites</i>	16
LC línea de costa	1
MNDWI índice de agua de diferencia normalizado modificado	8
MSS <i>multispectral scanner</i>	51
NASA administración nacional de la aeronáutica y del espacio de los Estados Unidos	15
NIR infrarrojo cercano	31

NDVI índice de vegetación de diferencia normalizada	60
NDWI índice de agua de diferencia normalizado	8
OLI <i>operational land imager</i>	53
QGIS sistema de información geográfica de software libre	64
RMSE raíz del error cuadrático medio	54
RVB <i>returned beam vidicom</i>	54
SAR radar de apertura sintética	6
SCP <i>plug-in</i> de clasificación semi-automática	64
SPOT satélite para la observación de la tierra	6
SWIR1 infrarrojo de onda corta 1	60
SWIR2 infrarrojo de onda corta 2	63
TIRS <i>thermal infrared sensor</i>	53
TM <i>thematic mapper</i>	51
USGS servicio geológico de los Estados Unidos	55
WI1 índice espectral de agua 1	69
WI2 índice espectral de agua 2	69

Introducción

1.1 | Zonas costeras y su importancia

Las zonas costeras son uno de los ecosistemas más productivos y vulnerables del mundo (Mani et al., 2013). Además, concentran gran parte de la población mundial (Vitousek et al., 1997), siendo por ello fuentes de gran valor de bienes y servicios. Por todo ello, se han convertido en lugares estratégicos para intereses de distinta índole (i.e., sociales, políticos, económicos, etc.) (Elko et al., 2014). Los cambios ambientales así como el correspondiente impacto sobre los sistemas naturales y los asentamientos humanos alrededor de dichas zonas están siendo objeto de estudio en muchos campos científicos (Feyisa et al., 2014). Es por esto que la monitorización de la línea de costa (LC) se ha convertido en un tema esencial para las políticas públicas de los países alrededor del mundo (Toimil et al., 2020).

La detección de la LC no solamente es una preocupación de gran importancia para los sistemas integrados de gestión costera, sino que es una tarea compleja ya que requiere de la utilización de información precisa para entender de manera fidedigna cómo ocurren los cambios en la costa y los agentes forzadores envueltos (Sheeja and Ajay-Gokul, 2016). Para contribuir a este conocimiento es necesario desarrollar metodologías científicas de acuerdo con los recursos disponibles, características de la zona de estudio, el período de tiempo estu-

diado y el desarrollo tecnológico, entre otros factores. Así, es posible seguir entendiendo los procesos hidrodinámicos que influyen en la dinámica morfológica de las playas bajo distintas escalas espacio-temporales. De esta manera se facilita la efectiva gestión y conservación de las mismas.

En las últimas décadas, los métodos comúnmente usados para la detección y monitoreo de la LC han sido campañas de campo (Holland and Holman, 1996; Masselink et al., 2004), estudios cartográficos y análisis de fotografías aéreas (Basterretxea et al., 2007; Del Río et al., 2013); pero estos métodos tienen la desventaja del alto costo económico y computacional, además de las limitaciones espacio-temporales para obtener datos a mediana y gran escala (Boak and Turner, 2005). En cambio, las técnicas de teledetección han resultado ser de gran ayuda en el estudio de la evolución de las áreas costeras debido al incremento de disponibilidad de imágenes satelitales, la mejora en la resolución espacial, temporal y radiométrica de los sensores, el desarrollo de herramientas de análisis de datos geográficos (plataformas de Sistemas de Información Geográfica) y el desarrollo de técnicas de procesamiento de imágenes (Ouma and Tateishi, 2006). En consecuencia se han venido desarrollando distintas metodologías de detección y extracción de línea de costas a partir de imágenes espaciales multi-espectrales.

1.2 | Zonas Deltaicas

Entre los distintos sistemas costeros con una dinámica más activa destacan las bahías, los estuarios, los deltas, las dunas y las playas. Los deltas son geomorfologías costeras compuestas de grupos subaéreos y subacuáticos de sedimentos fluviales que forman un paisaje aluvial por deposición en la desembocadura de un río (Wright, 1978). Son formaciones en la *interfase* costera donde los sedimentos provenientes del río son removidos por efecto de la marea o del oleaje (Schwartz, 2005). En muchos casos se crean complejos deltas aluviales, los cuales entran a la plataforma continental causando el desarrollo de formaciones de depósitos fuertes. Un buen ejemplo de este tipo de depósitos es el delta del

Guadalfeo (Maldonado, 2008). En la figura 1.1 se puede observar los cambios en la posición de la LC durante los últimos 25 años en el delta del Guadalfeo, en parte debido a la construcción de la presa de Rules (puesta en funcionamiento en 2004).

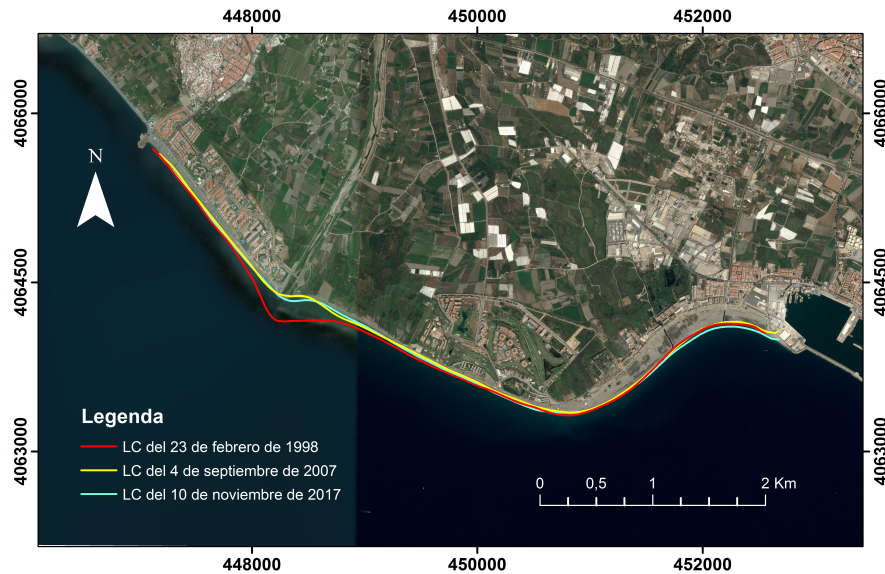
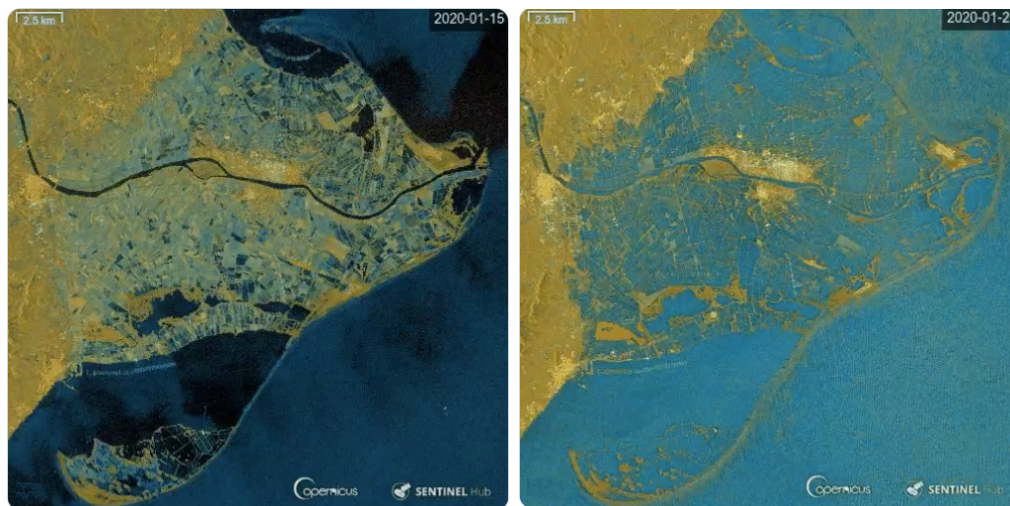


Figure 1.1: Línea de costa en distintas fechas que muestra la evolución del delta del Guadalfeo en los últimos 20 años.

Los sistemas deltaicos son de gran importancia económica, ya que usualmente concentran grandes poblaciones y áreas de interés para ciertas actividades socio-económicas como la agricultura, la piscicultura, la pesca y la explotación turística (Jabaloy-Sanchez et al., 2014). Esto ha derivado en una rápida demanda de recursos en estos sistemas naturales, lo que se refleja en grandes cambios; algunos de los cuales son potencialmente irreversibles (Young et al., 2017). Hay estudios que demuestran que los deltas (y las LC adyacentes) han venido sufriendo pérdida de terreno debido a la erosión y disminución de aportación de sedimentos de los ríos (Li and Gong, 2016; Terrano et al., 2016; Xu, 2018). En algunos casos, esta reducción se debe a la construcción de represas aguas arriba (Bergillos et al., 2016b; Jabaloy-Sánchez et al., 2010; Ranasinghe et al., 2019; Restrepo and López, 2008). Adicionalmente, dada la influencia antropológica, se vienen estudiando los cambios a los que podrían verse ex-

puestos debido a factores relacionados con el cambio climático (Andersson et al., 2006; Jimenez et al., 2016; Sanchez-Arcilla et al., 2008), ya que por sus características (están directamente sujetos a su interacción entre el mar, el río, la tierra y los factores atmosféricos), estos son de los primeros sistemas naturales en notar las consecuencias (Fatorić and Chelleri, 2012). Por estas razones se hace imprescindible su estudio.

Un ejemplo claro de la vulnerabilidad de estas zonas se puede observar en lo acaecido recientemente por el paso del temporal "Gloria", que en menos de cuatro días ocasionó una gran inundación en el delta del Ebro, dejando cubierta de agua más de 4.000 ha de territorio, con las correspondientes pérdidas tanto humanas como de cultivos ecológicos de arroz que quedaron anegados. En la figura 1.2a se puede observar el estado del Delta el 15 de enero de 2020, antes del temporal, y en la figura 1.2b se puede ver cómo quedó inundado casi por completo. Gracias a datos satelitales como las imágenes del satélite Sentinel-1 del proyecto Copernicus, es posible contar con información bastante cercana a la realidad y casi en tiempo real.



(a) Antes del paso de la borrasca

(b) Tras el paso de la borrasca

Figure 1.2: Imágenes del satélite Sentinel-1 antes y después de la borrasca "Gloria" en el delta del Ebro.

En diversas investigaciones se han venido utilizando los datos procedentes

de imágenes Landsat para el análisis de cambios en la línea de costas en algunos deltas, tales como: Ghanavati et al. (2008), quien detectó e identificó cambios en varias formaciones geomorfológicas en el delta de Hendijan (Irán). White and El Asmar (1999) utilizaron imágenes Landsat para monitorear el delta del Nilo. Zhu (2001) aplicó técnicas de teledetección para monitorear el cambio de la LC del delta del río Perla, confirmando que tales métodos son eficaces y económicos para monitorear zonas costeras en donde hayan cambios rápidos. Tong et al. (2014) cuantificó el cambio de la LC en el delta del río Rojo en Vietnam, teniendo en cuenta sectores de erosión, acreción y movimientos de las barras de arena.

1.3 | Teledetección

La teledetección (detección remota, *remote sensing* o sensado remoto), se refiere al reconocimiento a distancia (Colwell, 1966) para obtener información sobre datos físicos de un objeto (Lintz and Simonett, 1976).

En los últimos 50 años se han venido desarrollando técnicas de teledetección debido a las ventajas que brinda en la aportación de datos a distintas escalas espacio-temporales comparadas con las campañas *in situ*. En concreto, estas últimas pueden resultar más complicadas de realizar, teniendo en cuenta la logística de implementación, por la continuidad en el tiempo; la localización física en zonas de compleja actividad costera (ya sea por oleaje, mareas, etc.); la dificultad de acceso a la zona de interés o incluso por la utilización antropogénica. Todo ello implica que la teledetección constituye una herramienta muy importante en el estudio sobre la morfología costera.

Existen diferentes tipos de técnicas de teledetección considerando las diferentes posibilidades de medición de acuerdo a la longitud de onda (de Vries et al., 2011). Éstas se pueden clasificar desde distintas perspectivas. Una obedece al tipo de plataforma en la cual se coloca el sensor que realiza la detección de la información. Por lo tanto, según ésta, podemos encontrar las plataformas terrestres, aéreas y satelitales (Barrett and Curtis, 1992; Demirel and Anbarjafari, 2011; Duzgun and Demirel, 2011).

Tanto las terrestres¹ como las plataformas aéreas, se han convertido en herramientas eficientes para analizar la morfología de las playas y estudiar la evolución en el tiempo de la LC (Brignone et al., 2012; Del Río et al., 2013). Sin embargo estas tecnologías pueden estar restringidas tanto temporal (Boak and Turner, 2005) como espacialmente (Pardo-Pascual et al., 2018).

Por otra parte, la tecnología utilizada en las plataformas satelitales ofrece una visión sinóptica de la tierra a distintas escalas temporales según las resoluciones con las que trabaja. Por sus ventajas, esta tecnología ha venido ganando importancia en el estudio de las zonas costeras (Sandidge and Holyer, 1998), como es el caso de los satélites de radar que se han utilizado para identificar y cuantificar oleaje (Krogstad and Barstow, 1999). Kunte (1994) estudió el comportamiento de la deriva litoral por medio de imágenes Landsat. El-Asmar and White (2002) analizaron los cambios en la LC a partir de la construcción del puerto en Damietta en el delta del Nilo a través de imágenes Landsat (TM). Otros autores como Dellepiane et al. (2004); Mason and Davenport (1996); Niedermeier et al. (2000), han propuesto algoritmos para la detección de la LC a partir de imágenes de radar de apertura sintética (SAR). Lafon et al. (2004) calcularon la morfología y las tasas de migración, particularmente en la dirección longitudinal, de barras de arena rítmicas a lo largo de la costa en el suroeste de Francia con imágenes de la serie de satélites franceses *Satellite Pour l'Observation de la Terre*: satélite para la observación de la tierra (SPOT). Pimentel et al. (2017) utilizaron imágenes Landsat para estimar la superficie de cobertura de nieve en el sistema montañoso de Sierra Nevada, permitiendo obtener series de mapas de nieve con precisiones fiables. Caballero et al. (2018) utilizaron imágenes provenientes de sensores de diferentes satélites (Landsat-8, Sentinel-2A, Worldview-2 y 3, GeoEye-1) para monitorear la pluma de turbidez generada durante operaciones de dragado en el estuario del Guadalquivir, demostrando la viabilidad de monitorear sólidos suspendidos durante operaciones de dragada por medio imágenes de mediana-alta resolución espacial.

¹Como es el caso de la vídeo monitorización, que consiste en colocar una cámara fija en un lugar a cierta altura, para que pueda grabar continuamente el objeto de estudio, por ejemplo una playa (Holman et al., 1993; Lippmann and Holman, 1989)

Los sensores de imágenes multiespectrales capturan imágenes de al menos 2 ó más longitudes de onda del espectro electromagnético. En el sensor, cada canal es sensible a la radiación dentro de una banda angosta de longitud de onda, lo que deriva en una imagen multicapa que contiene tanto información espectral como intensidad de luz en cada pixel de la muestra (Keith, 2016). Los satélites multiespectrales ofrecen numerosas ventajas, como la capacidad de almacenar gran cantidad de datos, disponibilidad de imágenes repetidas de un mismo lugar en distintas fechas, y el hecho de que virtualmente cubre todo el planeta. Como resultado, las imágenes multiespectrales son potencialmente más útiles que las fuentes previamente utilizadas para obtener tendencias de evolución a mediano y largo plazo (Pardo-Pascual et al., 2012). Muchos investigadores han constatado la importancia de las imágenes satelitales para la detección de la línea de costa. Almonacid-Caballer et al. (2013); Bayram et al. (2008); Kuleli et al. (2011); Li and Gong (2016) han desarrollado distintas metodologías utilizando imágenes satelitales para extraer línea de costa con resultados satisfactorios.

1.3.1 | Proyecto Landsat

El proyecto Landsat se ha convertido en una de las bases de datos de imágenes espaciales más utilizadas para el estudio de la tierra debido a la gran colección de imágenes multiespectrales de mediana resolución espacial y temporal, además de ser de libre acceso a partir de 2008 (Zhu, 2017). Su aplicación se ha visto reflejada en áreas como la agricultura (Prishchepov et al., 2012), la prevención de desastres (Yusuf et al., 2001), la ordenación territorial (Fuller et al., 1994; Yuan et al., 2005), hidrología (Caballero et al., 2018; Pimentel et al., 2015; Santillan et al., 2011), etc.

En las últimas décadas, muchos investigadores han usado las imágenes satelitales Landsat para detectar la LC. Estos estudios se basan en la utilización de técnicas de procesamiento de imágenes tales como: segmentación y umbralización (Bayram et al., 2008; El-Asmar and White, 2002; Pardo-Pascual et al., 2012; Zhang et al., 2013), utilización de índices espectrales para detectar cuerpos de agua (NDWI, AWEI, MNDWI, entre otros) (Hagenaars et al., 2018; Kuleli et al.,

2011; Li and Gong, 2016; Liu et al., 2017; Rokni et al., 2014), técnicas de clasificación (redes neuronales, isodata, máquinas de vectores de soportes, entre otras) (Petropoulos et al., 2015; Rasuly et al., 2010; Sarp and Ozcelik, 2016; Yu et al., 2011; Zhu, 2001), metodología de lógica difusa (Ghanavati et al., 2008), relación de bandas espectrales (Tong et al., 2014), interpretación visual del nivel máximo de marea (Mahapatra et al., 2014). La mayoría de estas investigaciones sólo utilizaron algunas imágenes Landsat para detectar y monitorear la LC (con menos de 10 imágenes en muchos casos), lo que puede propiciar que no se obtenga un dato que represente de forma fiable el comportamiento de la línea costera a lo largo de 20 ó 30 años.

Índices Espectrales

Existen varios métodos para la detección de cuerpos de agua a partir de imágenes dependiendo del número de bandas utilizadas. Usualmente se dividen en dos categorías: unibanda o multibanda (Xu, 2006). Los índices espectrales son métodos de detección multibanda y han sido ampliamente utilizados para separar agua de otro tipo de características en las imágenes satelitales debido a su rápida implementación, sencillez y precisión (Fisher et al., 2016; Ghosh et al., 2015; Zhou et al., 2017). En algunas de las técnicas de procesamiento mencionadas anteriormente para la detección de LC, la identificación de esta se realiza de manera manual, lo que puede llegar a ser muy engorroso, prolongado y dependiente de la persona que lo realiza (Modava et al., 2019). Otros, en cambio, sí permiten la identificación automática como es el caso de los índices espectrales. Esto es imprescindible en estudios a largo plazo, ya que reduce los errores humanos, pues no requiere su intervención (o mínimamente) ayudando a crear procesos eficientes y estándares. Los índices espectrales generalmente usados para la detección de LC son: el índice de agua de diferencia normalizado (NDWI) (McFeeters, 1996), el índice de agua de diferencia normalizado modificado (MNDWI) (Xu, 2006) y el índice de extracción automática de agua (AWEI) (Feyisa et al., 2014).

1.4 | Objetivos

El objetivo principal de la tesis es proponer un nuevo índice espectral de aplicación en una metodología de detección automática de línea de costa a mediana escala espacio-temporal, con el fin de contribuir al conocimiento de los procesos relacionados con los cambios morfológicos en ambientes deltaicos a través de técnicas de teledetección.

Para alcanzar el objetivo general, la investigación se ha subdividido en los siguientes objetivos específicos:

1. Comprender los principios básicos de la teledetección, su importancia y las distintas aplicaciones de esta tecnología.
2. Analizar el estado del arte sobre las distintas técnicas de la teledetección para detallar los principales aspectos a tener en cuenta al seleccionar la técnica óptima conforme a la tecnología y recursos disponibles.
3. Seleccionar el sistema de teledetección apropiado según el tipo de imagen efectiva, para la detección de la línea de costa en zonas micro-mareales y construir una base de datos que pueda ser aprovechada en futuras investigaciones.
4. Revisar, analizar y comparar los distintos índices espectrales utilizados actualmente para la detección de la línea de costa.
5. Proponer un nuevo índice a partir de un análisis empírico de imágenes multiespectrales en áreas micro-mareales que aporte una mejora en la detección de la línea de costa.
6. Diseñar una metodología que detecte de forma automática y fiable la línea de costa, y que además pueda ser aplicado a distintas zonas para establecer conclusiones generales a partir de la comparación y discusión de los resultados obtenidos.

1.5 | Estructura de la Tesis

Esta tesis ha sido dividida en 8 capítulos. El capítulo 2 describe la base teórica en la que se enmarca la metodología relacionada con los principios básicos de la teledetección. El capítulo 3 detalla los elementos básicos que se deben tener en cuenta para seleccionar una técnica de *Remote Sensing* según las necesidades de investigación. El capítulo 4 explica las zonas de estudio seleccionadas y los datos utilizados para el análisis. El capítulo 5 explica el planteamiento del nuevo índice espectral propuesto. El capítulo 6 detalla la metodología utilizada para la detección automática de la LC. El capítulo 7 muestra la validación de la metodología en las tres zonas seleccionadas: Delta del Guadalfeo, Delta del Adra y Delta del Ebro. Finalmente, el capítulo 8 recoge las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación propuestas.

1.6 | Publicaciones derivadas de la tesis doctoral

1.6.1 | Artículos Científicos Indexados

Viaña-Borja, S.P.; Ortega-Sánchez, M. Automatic Methodology to Detect the Coastline from Landsat Images with a New Water Index Assessed on Three Different Spanish Mediterranean Deltas. *Remote Sens.* 2019, 11, 2186.

1.6.2 | Artículos Científicos en Preparación

Viaña-Borja, S.P.; Ortega-Sánchez, M. Basic parameters to select a remote sensing system in coastal studies. Posiblemente sea presentada a la revista *Remote Sensing*.

1.6.3 | Conferencias Internacionales

Viaña-Borja, S.P. Proposal of a new water index for automatic coastline detection in a Mediterranean Delta (Guadalfeo). 10th Conference International Perspective on Water and Environment 2018, Cartagena de Indias (Colombia).

1.6.4 | Conferencias Nacionales

Viaña-Borja, S.P., Ortega-Sánchez, M. Metodología para la detección automática de la LC en el delta del río Ebro utilizando imágenes de satélite Landsat. 5th Jornadas Doctorales, Murcia (España).

Viaña-Borja, S.P., Ortega-Sánchez, M. Propuesta de un nuevo índice espectral para la detección de LC utilizando imágenes Landsat (Delta del Adra). 2th Congreso Nacional de Investigadores en Formación, Granada (España).

Teledetección

*Son nuestras decisiones las que muestran
quiénes somos realmente,
más que nuestras habilidades.*

J. K. Rowling

RESUMEN: En este capítulo se da una breve descripción sobre la teledetección, su evolución en el tiempo y los principales conceptos en los que se fundamenta. Finalmente se mencionan algunas de las aplicaciones más utilizadas.

2.1 | Definición

En la actualidad se usan varios términos para referirse a la "Teledetección", entre los que destacan: *remote sensing*, sensado remoto, detección remota o a distancia. Indistintamente del término por el que se opte, el concepto es el mismo, pues hace referencia al estudio de objetos a distancia sin necesidad de estar en contacto directo con él.

Entre las definiciones que se han dado, destacamos las que recopilan Campbell and Wynne (2011):

- En su sentido más estricto simplemente significa “reconocimiento a distancia” (Colwell, 1966).
- Es el arte o la ciencia de decir algo sobre un objeto sin tener contacto con él (Fischer et al., 1976).
- Es la adquisición de datos físicos de un objeto sin tener contacto o tocarlo (Lintz and Simonett, 1976).

El término "remote sensing" se utiliza por primera vez en Estados Unidos en los años 50 por Evelyn Pruitt, que trabajaba en la Oficina Naval de Investigación de los Estados Unidos. Actualmente este término es usado para describir la ciencia (y el arte) de identificar, observar y medir un objeto sin entrar en contacto directo con él. Este proceso incluye la detección y medición de radiación de diferentes longitudes de ondas reflejadas o emitidas de objetos o materiales distantes, que son identificadas y categorizadas en clase/tipo, sustancia y distribución espacial (Graham, 1999).

2.2 | Historia

El nacimiento de la teledetección se puede decir que se remonta a los inicios de la fotografía en el siglo XIX, y que los cimientos para la teledetección espacial empezaron al sujetar una cámara a un globo aéreo, cuya autoría es atribuida a Gaspard Félix Tournachon en 1958 (Campbell and Wynne, 2011). Fue durante las dos guerras mundiales donde se desarrollaría la tecnología que hoy nos permite obtener datos a través de la teledetección tal y como la conocemos. En la primera Guerra Mundial se desarrolló fuertemente la tecnología necesaria para empezar a ver la tierra desde cierta altura, debido a las actividades de reconocimiento militar que requerían. Esto impulsó el desarrollo de técnicas de medición sobre las fotografías¹ (Campbell, 2008). Desde entonces y hasta la década de los sesenta, la fotografía aérea permaneció siendo la única herramienta

¹Técnicas de fotogrametría.

estándar para mostrar la superficie terrestre desde una perspectiva vertical u oblicua (Agrawal and Guadadhe, 2014).

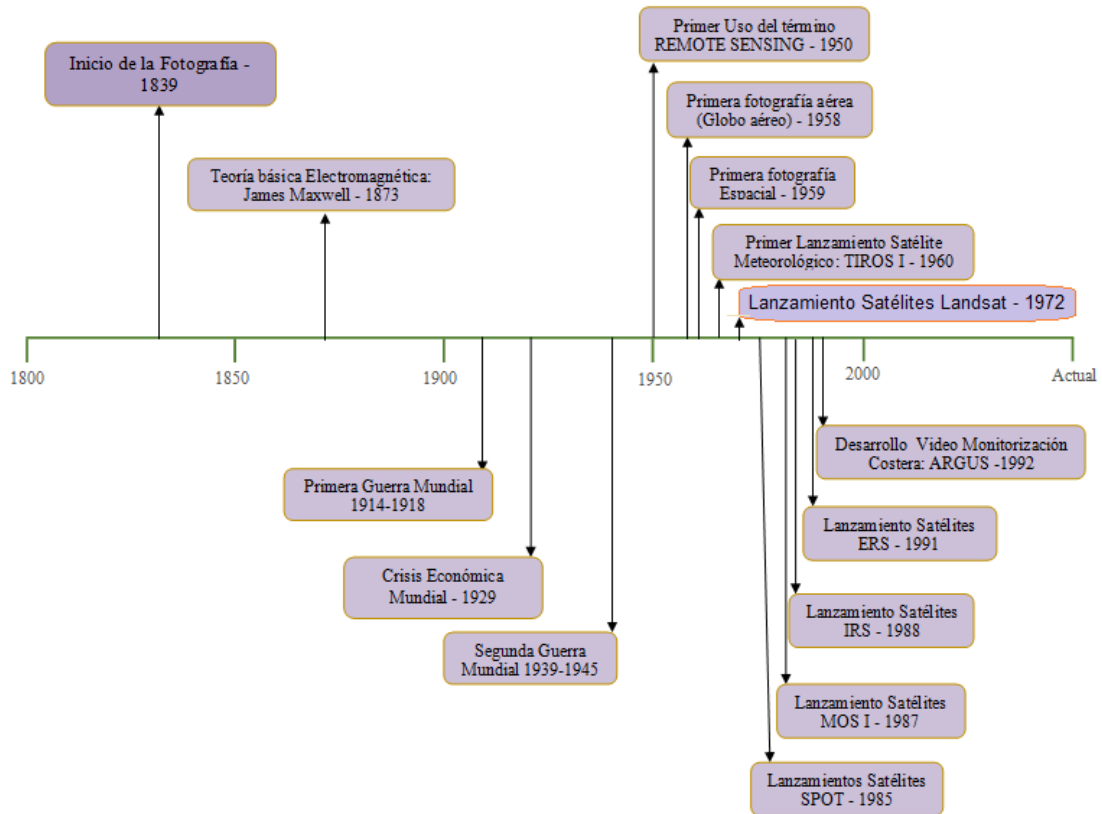


Figura 2.1: Línea de tiempo que muestra los hitos más relevantes relacionados con la evolución de la teledetección.

La fotografía espacial comienza en 1916 en Estados Unidos, con fotos tomadas a bordo de un cohete V-2, dentro de la atmósfera (Lillesand, 1990). Posteriormente desarrollada en la década de los sesenta, con los programas de la administración nacional de la aeronáutica y del espacio de los Estados Unidos (NASA) (Chuvieco, 2016). Pero fue a partir de la Segunda Guerra Mundial cuando se desarrolló el conocimiento de la aplicación de las otras regiones del espectro electromagnético, aquellas no visibles al ojo humano, la región del infrarrojo y el microondas, desarrollando y perfeccionando sensores que captaran información en estas regiones (Campbell, 2008). Con mejoras en los sensores de imagen, los

satélites meteorológicos comenzaron a proporcionar imágenes más distintivas de ambas características, atmosféricas y terrestre (Lillesand, 1990).

Posteriormente se establece en 1966 el programa *earth resources observation system program* (EROS). Con él se puso en órbita en 1972 el primer satélite específicamente dedicado al estudio de recursos naturales de la tierra, el *earth resources technology satellite* (ERTS-1). Que posteriormente fue rebautizado con el nombre de Landsat 1, cuya serie de satélites proporciona una observación continua de toda la superficie terrestre desde el espacio (Gandía and Melía, 1991).

Hasta mediados de los ochenta, la mayoría de los satélites pertenecían a Estados Unidos y Rusia, pero en las últimas décadas otras naciones han ido lanzando los suyos propios. Cabe mencionar: la serie de Satélites para la Observación de la Tierra (SPOT), lanzada por Francia a partir de 1985; el primer satélite lanzado por India en su programa nacional de teledetección (*Indian remote sensing satellite program* (IRS)) en 1988; los satélites lanzados por Japón en 1992 (*Japan earth resources satellites* (JERS)); el satélite Radarsat lanzado por Canadá en 1995 y los satélites lanzados entre 1991 y 1995 por el Consorcio Europeo (*European remote sensing satellites* (ERS)) (Gibson, 2000). En la figura 2.1 se puede ver a groso modo la evolución temporal de la detección remota espacial.

2.3 | Marco Conceptual

2.3.1 | Funcionamiento Básico de cualquier Sistema de Detección Remota

El funcionamiento de la teledetección, como puede verse en la figura 2.2, se asimila a lo que solemos hacer para percibir información de los objetos que nos rodean. Con nuestra vista percibimos la forma, color, textura, y otras características de los objetos que observamos, gracias a la interacción entre la energía electromagnética y dichos objetos. Finalmente es nuestro cerebro quién registra y procesa la información.

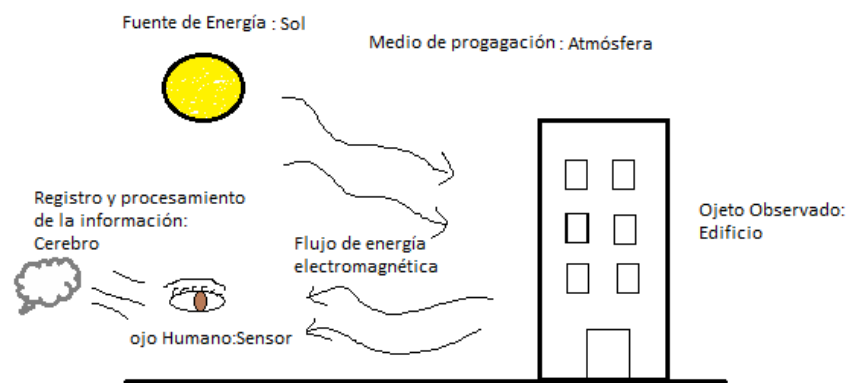


Figura 2.2: Analogía entre la teledetección y el registro de información humana a través de los sentidos.

Para entender mejor la relación del ejemplo anterior con la teledetección, serán desglosados los elementos básicos que intervienen mediante el esquema mostrado en la figura 2.3.

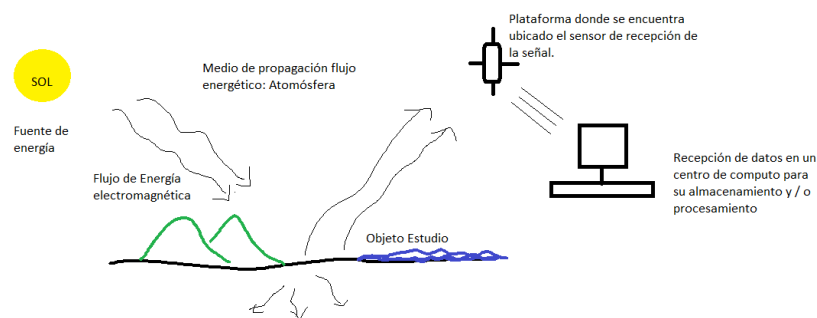


Figura 2.3: Explicación esquemática del proceso de teledetección.

Como se puede observar al comparar ambos esquemas, el sistema funciona prácticamente de la misma forma. Alguna de las diferencias radica en que nuestro ojo sólo percibe una pequeña porción del amplio rango de energía electromagnética existente, dicha porción corresponde a la región óptica, o visible. Otra diferencia sería el procesamiento de información (Cracknell and Hayes, 2007). En el campo informático se han venido desarrollando técnicas y algoritmos para el aprovechamiento de los datos obtenidos en las distintas franjas de energía electromagnética utilizables en teledetección.

En síntesis, un sistema básico de teledetección utiliza la energía electromagnética (mayormente la del rango visible, infrarrojo y microondas), que puede ser reflejada, emitida o emitida-reflejada por alguna fuente. La señal de la energía es recibida por un sensor colocado en alguna plataforma (terrestre, aérea o espacial) y posteriormente registrada y procesada por medio de un ordenador.

2.3.2 | La Energía Electromagnética y sus Principios Básicos

La tecnología de la teledetección se basa en la utilización de la energía electromagnética, por lo que es necesario tener claro los conceptos básicos sobre el comportamiento de este tipo de energía y así entender las capacidades y limitaciones de la teledetección (Harahsheh, 2005). Estos conceptos permitirán una mejor comprensión, por ejemplo, de los distintos tipos de sensores que existen, la importancia del comportamiento espectral de los objetos de estudio, entre otras cosas, y de esta manera se contará con el conocimiento apropiado para realizar una mejor selección de los parámetros requeridos para realizar estudios utilizando esta tecnología. Teniendo en cuenta esto, en esta sección se mencionan algunos conceptos relacionados con la teoría electromagnética.

El comportamiento de la energía electromagnética se puede comprender a partir la teoría de ondas y la de partículas (fotones o cuantos) (Campbell and Wynne, 2011; Chuvieco, 1995; Lillesand et al., 2007). En 1965, James Maxwell propone que la energía electromagnética está compuesta por dos campos ortogonales entre sí², que se propagan como ondas transversales, a la velocidad de la luz, y que sus dos principales características físicas están relacionadas entre ellas de forma inversamente proporcional, según la Ec. 2.1.

$$c = \nu\lambda \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde,

c =Velocidad de la Luz (constante = 3×10^8 m/s).

²El campo eléctrico y el magnético.

ν =frecuencia.

λ =longitud de onda.

Posteriormente, se complementa con la teoría de partículas desarrolladas por Max Planck y Albert Einstein. En 1900, Plank sugiere que la energía está compuesta por unidades discretas o cuantos de luz. Planck define una constante para relacionar la frecuencia con la energía radiante de cada uno de los cuantos de luz (Ec. 2.2).

$$Q = h\nu \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde,

Q= Energía radiante.

h= Constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} J \text{ seg}$).

ν = Frecuencia.

En 1905, Albert Einstein se apoya en la teoría de Plank (Ec. 2.2) y la combina con la de Maxwell (Ec. 2.1), proponiendo que la luz consistía en paquetes discretos llamados fotones, los cuales mantenían alguna naturaleza de onda, concluyendo que la luz era de naturaleza dual (comportamiento partícula / onda).

Por lo tanto, combinando las ecuaciones Ec. 2.1 y Ec. 2.2, se obtiene la Ec. 2.3.

$$Q = h(C/\lambda) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Esta ecuación implica que a mayor longitud de onda (o menor frecuencia), el contenido energético será menor y viceversa. Así, la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquellas con longitudes de onda más corta, de ahí que las primeras requieran medios de detección más sofisticados (Chuvienco, 1995).

Teniendo en cuenta que todos los objetos con temperatura por encima del cero absoluto emiten energía, la cantidad de energía y la longitud de onda a la que es emitida, dependen de la temperatura del objeto. Esto es explicado a

través de otro concepto básico en el estudio de la energía electromagnética, el concepto teórico de Cuerpo Negro, introducido por Gustav Kirchhoff en 1862. Un cuerpo negro es una fuente de energía hipotética que se comporta de una manera ideal. Es capaz de absorber toda la radiación incidente, sin reflejar ninguna. Un cuerpo negro emite con perfecta eficiencia. Su efectividad como radiante de energía varía solo en tanto que la temperatura varíe (Campbell and Wynne, 2011). Esta propiedad es expresada a través de la ley de Stefan-Boltzmann (Ec. 2.4).

$$M = \sigma T^4 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde,

M=exitancia radiante total desde la superficie de una material.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$).

T= temperatura absoluta del material en K.

Adicionalmente, para un cuerpo negro, la longitud de onda en donde la máxima emitancia espectral radiante ocurre, varía de forma inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo, lo que se observa en la ley de desplazamiento de Wien (Ec. 2.5) (Lillesand et al., 2007).

$$\lambda_m = A/T \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde,

$A = 2898 \mu\text{mK}$.

λ_m = longitud de onda a la máxima exitancia espectral radiante.

T= temperatura en K.

Este parámetro λ_m es importante para saber bajo qué longitudes de onda se puede estudiar algún objeto de forma más efectiva, ya que sabiendo en qué banda del espectro electromagnético irradia mayor energía, se puede escoger mejor el tipo de sensor que captaría mayor información del objeto en estudio.

2.3.3 | Interacción de la Energía en la Atmósfera y/o Superficie Terrestre

La atmósfera se interpone entre cualquier sensor y la superficie terrestre, interfiriendo de diversas formas en el flujo radiante (Chuvienco, 1995). Esta interferencia depende, entre otros factores, del espesor de atmósfera que atraviesa la energía radiante (no es lo mismo la energía que debe captar un sensor en el espacio o en una plataforma aérea o terrestre), así como de los componentes de la atmósfera y el tamaño de sus correspondientes partículas.

En síntesis, hay varios procesos físicos que intervienen en el paso de la energía radiante, algunos tienen que ver con su interacción con la atmósfera y otros con la interacción con la superficie terrestre.

En cuanto a la interacción de la energía con la atmósfera, se dan los procesos físicos de absorción y dispersión.

- Dispersión (*scattering*) es la difusión impredecible de la energía debido a las partículas en la atmósfera (Lillesand et al., 2007). Existen distintos tipos de dispersión dependiendo del tamaño de las partículas con las que interactúa la energía electromagnética, la dispersión de Rayleigh³, dispersión de Mie⁴ y dispersión no selectiva⁵.
- En el proceso de absorción lo que ocurre es que la partícula con la que interactúa la energía electromagnética absorbe energía en alguna longitud de onda específica (esto depende del tipo de partículas), es decir ocurre una pérdida de energía del rayo de luz incidente.

En la teledetección, la atmósfera juega un papel importante. Dependiendo de las longitudes de onda, los efectos de los constituyentes de la atmósfera sobre

³En el caso de que las moléculas de la atmósfera y otras partículas presentes sean de un tamaño menor a la longitud de onda de la energía electromagnética con la que interactúa.

⁴Cuando el tamaño de dichas partículas es de igual tamaño a la longitud de onda.

⁵Cuando el tamaño de dichas partículas sea mayor a la longitud de onda

las radiaciones, influyen en la calidad de los datos obtenidos. Hay longitudes de ondas dentro del espectro electromagnético que son fuertemente absorbidas y bloqueadas por la atmósfera. Por lo tanto, para el uso de la teledetección se utilizan aquellas regiones de bandas del espectro electromagnético (EM) que son capaces de atravesar la atmósfera a través de las llamadas “ventanas de transmisión atmosféricas”, presentes en algunos rangos de longitudes de onda del EM. Estas ventanas existen en la región de micro-ondas, algunas bandas de la región del infrarrojo, prácticamente toda la región del espectro visible, y parte de la de ultravioleta.

2.3.4 | El Espectro Electromagnético y su Influencia en Teledetección

El espectro electromagnético (ver figura 2.4) es un esquema que muestra la distribución posible de la energía electromagnética de acuerdo a su longitud de onda (o frecuencia). Está dividida en bandas de acuerdo a la similitud en características de comportamiento según pequeños rangos de longitud de onda. La división del EM comprende los rayos gamma, rayos x, luz ultravioleta, rango visible, infrarrojo y microondas (que incluyen las ondas de radio). Las fronteras que dividen dichas regiones no son exactas, traslapándose unas con otras (Lillesand et al., 2007).

Las longitudes de ondas que se utilizan en teledetección son la región del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas. Los rayos x y gamma no suelen utilizarse debido a la opacidad de la atmósfera en este tipo de radiaciones (Sobrino, 2000).

Ultravioleta

Está subdividida por las zonas del ultravioleta cercano ($0.32\text{-}0.40\ \mu\text{m}$), el ultravioleta lejano ($0.32\text{-}0.28\ \mu\text{m}$) y el ultravioleta extremo ($<0.28\ \mu\text{m}$). El ultravioleta cercano es conocido por su habilidad de inducir fluorescencia (emisión de radiación visible) en algunos materiales y es la zona del ultravioleta que tiene

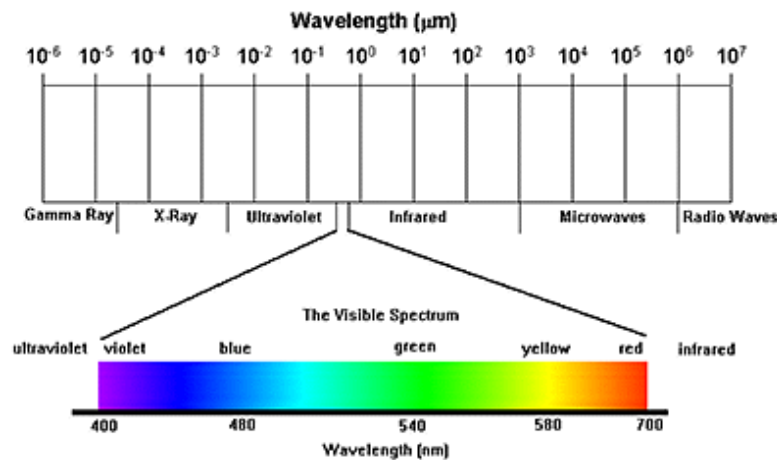


Figura 2.4: Esquema del Espectro Electromagnético. Tomado del tutorial online "Principios de Teledetección". Por Liew, S.C. 1997. Universidad Nacional de Singapur.

alguna aplicación en teledetección (diferenciación entre hojas sanas y marchitas) (Campbell and Wynne, 2011).

Visible

Comprendida entre las longitudes de onda 0.40 y $0.70 \mu\text{m}$, es la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales Azul (0.4 a $0.5 \mu\text{m}$), Verde (0.5 a $0.6 \mu\text{m}$) y el Rojo (0.6 a $0.7 \mu\text{m}$) (Chuvieco, 1995).

Infrarrojo

Esta región comprende las longitudes de onda desde 0.72 a $15 \mu\text{m}$. Está dividida en tres subregiones, en infrarrojo cercano (0.7 a $1.3 \mu\text{m}$), es conocido como infrarrojo reflejado y fotográfico, ya que puede detectarse a partir de films, filtros y cámaras similares a aquellas utilizadas en la región visible; el infrarrojo medio (1.3 a $8 \mu\text{m}$), donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Finalmente el infrarrojo lejano o térmico (8 a $15 \mu\text{m}$) que incluye la porción que emite de la superficie terrestre

(Campbell and Wynne, 2011; Chuvieco, 1995).

Microondas

El rango del espectro electromagnético que comprende esta región está entre 1mm y 1 m. Una de las características importantes de esta banda en el tema de teledetección radica en su capacidad de penetrar la atmósfera casi bajo cualquier condición atmosférica (Lillesand et al., 2007).

2.4 | Aplicaciones

La teledetección inicialmente se desarrolló en el campo militar para situaciones de reconocimiento y localización, pero en los últimos 50 años se ha venido utilizando en distintos campos relacionados con el estudio de la tierra y su entorno, algunos de estos son mencionados en la figura 2.4 (Campbell and Wynne, 2011; Lillesand et al., 2007). A medida que se ha ido conociendo más acerca de esta herramienta, se ha venido ampliando su campo de aplicación. Sin sustituir a las actuales, como son las de laboratorio y/o las mediciones de campo, pero complementando en gran medida la información aportada por las herramientas convencionales. En algunos casos incluso es la única herramienta posible dependiendo de las escalas espacio-temporales necesarias o localización de los fenómenos físicos de interés.

A lo largo de los años, cada vez más, se han venido aplicando las técnicas de teledetección en áreas relacionadas con el conocimiento de los ecosistemas marinos, dentro de los cuales destacan estudios de las zonas costeras y los fenómenos físicos que en este ocurren. Alguna de las aplicaciones relacionadas con estudios costeros así como los parámetros más estudiados de acuerdo a distintos autores como (Campbell, 2008; Cracknell and Hayes, 2007; Konecny, 2014; Lillesand et al., 2007; Sobrino, 2000), teniendo en cuenta distintas técnicas de *Remote Sensing*, se muestran la figura 2.5. Las primeras cinco clasificaciones hacen alusión a sensores utilizados por lo general en plataformas espaciales, mientras que la última clasificación, video-monitorización, es utilizada en plataformas de

tipo *on ground*.

Hidrología

- Estimación de área de cobertura y profundidad de nieve.
- Mediciones de Temperatura oceánica.
- Identificación de cuerpos de agua
- Identificación y seguimiento de crecidas (ríos) e inundaciones costeras
- Estimación de evapotranspiración
- Detección y monitoreo de contaminación como derrames de combustibles
- Estimación de precipitación
- Medidas del color del mar relacionado con parámetros biológicos (fitoplancton, clorofila, sedimentos, etc)
- Cartografías de zonas afectadas por inundaciones e identificación de zonas vulnerables
- Análisis de calidad de agua en embalses y lagunas.
- Control de Extracción de agua en acuíferos
- Seguimiento zonas de humedales
- Estimación de volúmenes de agua almacenada en las cuencas por las capas de nieve.

Ciencias de la Geosfera

- Mapeo geológico.
- Identificación de distintos tipos de rocas.
- Seguimiento en la erupción de volcanes por medio de cambios en la emisión de calor.
- Mapeo de temperatura de áreas de minas de carbón para el control de auto combustión debido a altas temperaturas.
- Reconocimiento áreas de canteras de materiales de construcción.
- Información litológica y estructura geológica.
- Identificación de depósitos minerales, gas o petróleo.
- Seguimiento de fallas activas y movimientos tectónicos para evaluación de riesgos sísmicos.
- Estimación del tipo de terreno de acuerdo a los patrones de drenaje presentes.
- Identificación de lineamientos geológicos
- Localización de agua subterránea y potencial minera a partir de distribución y orientación de lineamientos y fracturas del terreno.
- Identificación de tipos de rocas y minerales a partir de sus propiedades químicas
- Mapeo y clasificación de suelos y tipos de paisajes.

Oceanografía

- Distribución de corrientes oceánicas.
- Estados de mar
- Batimetría
- Corrientes superficiales,
- Velocidad del viento sobre la superficie del mar.
- Identificación de líneas de costa
- Monitoreo de sedimentación
- Seguimiento de hielo flotante en cuerpos de agua

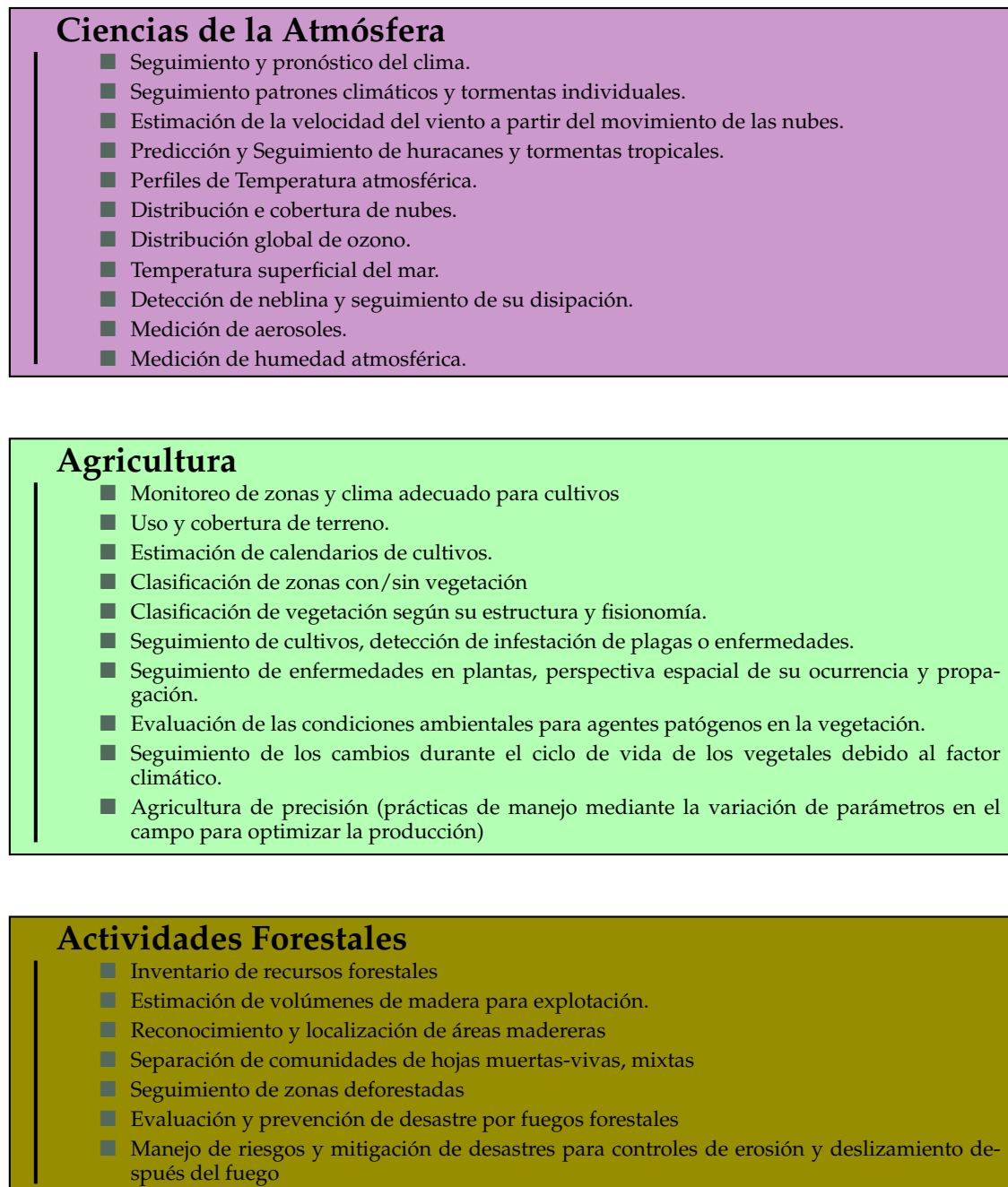


Figura 2.4: Distintas aplicaciones de la teledetección

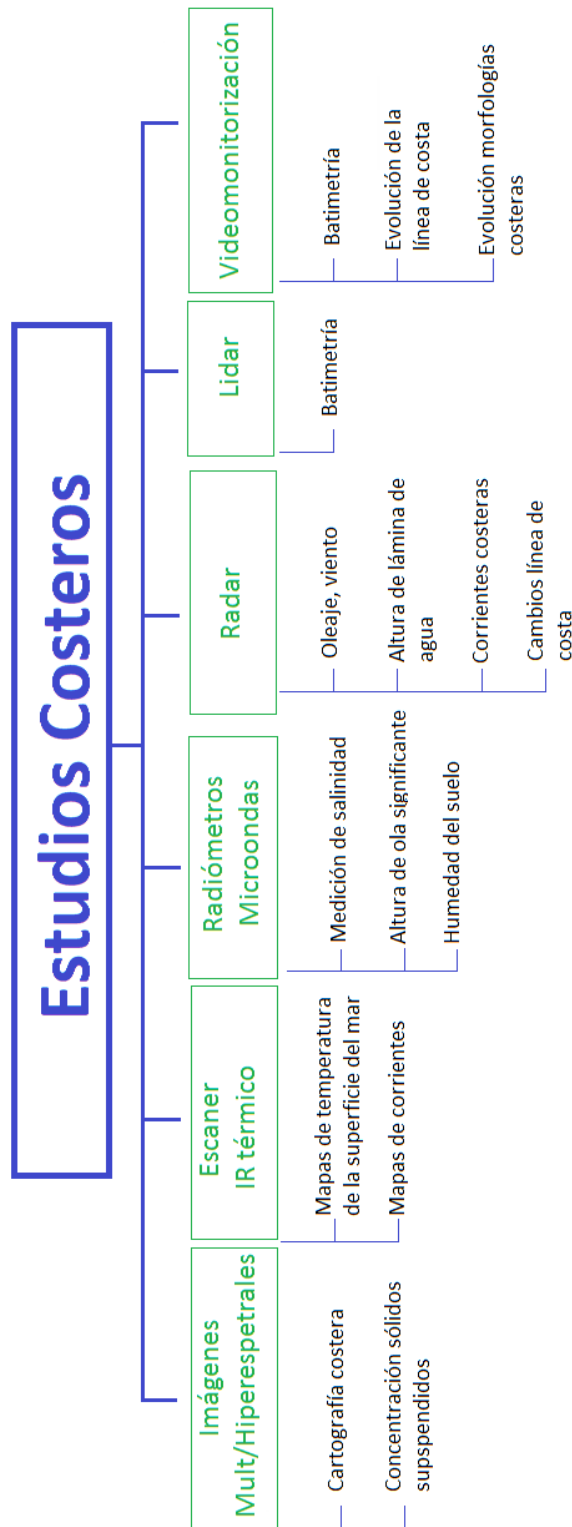


Figura 2.5: Aplicaciones en el área de estudios costeros

Cómo escoger un sistema de Teledetección

*La mente es igual que un paracaídas,
solo funciona si se abre.*

Albert Einstein.

RESUMEN: Este capítulo explica las características básicas a tener en cuenta para escoger un sistema basado en la tecnología de detección remota, así como los conceptos relacionados con cada característica y algunas fuentes posibles de datos abiertos, con el fin de que sea útil tanto para empezar un nuevo proyecto como para aprovechar el potencial de información que se puede obtener de estos datos.

Los sistemas de teledetección son cada vez más utilizados en el estudio de ciencias de la tierra dadas sus ventajas, en muchos casos, tanto a nivel operacional como económico, ya que brinda una amplia variedad de resolución espacio temporal acorde a los estudios a realizar.

Para escoger qué tipo de sistema se ajusta mejor a las necesidades del proyecto y/o investigación requerida, es necesario tener en cuenta como mínimo los parámetros que se muestran en la figura 3.1.

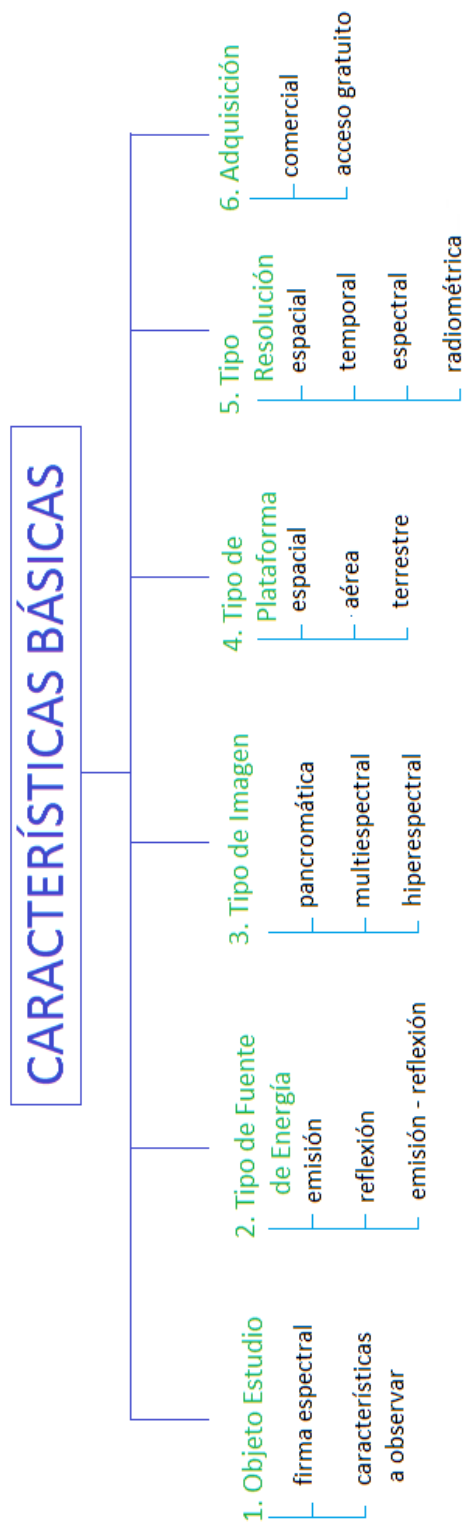


Figura 3.1: Parámetros básicos en teledetección antes de iniciar cualquier estudio.

3.1 | Objeto de Estudio

A la hora de escoger qué tipo de imagen es la más apropiada, es de vital importancia conocer el comportamiento espectral del objeto de estudio en las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, lo que se puede observar a través de las gráficas de firmas espectrales. En general, las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben. Para tipos de agua de tonalidad más clara, la mayor reflectividad se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente en el infrarrojo cercano (NIR), donde es prácticamente nula. Por lo tanto, suele ser en la banda del infrarrojo cercano donde mejor se aprecia la frontera tierra-agua. También hay que tener en cuenta que la absorptividad en esta banda, es mayor en cuanto la profundidad de la capa de agua es mayor. La franja del infrarrojo térmico posee una alta inercia térmica, lo que permite detectar con bastante facilidad plumas de aguas provenientes de fuentes ajenas al entorno. En la región del micro-ondas, el agua permite cierta capacidad de penetración de este tipo de ondas, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo y se trabaje con longitudes de ondas largas. Si existe una cierta rugosidad superficial (por ejemplo el oleaje), puede manifestarse en la imagen radar (Chuvieco, 1995).

A continuación se muestran algunas firmas espectrales de dos tipos de cuerpos de agua, extraídas de la biblioteca de firmas espectrales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Kokaly et al., 2017) para entender mejor este concepto y su incidencia. En la figura 3.2 se puede apreciar que la mayor reflectancia se obtiene en el rango de longitud de onda entre los 0.3 y 0.8 μm , específicamente alrededor de una longitud de onda de 0.56 μm . Esto indica que se podrían obtener datos utilizando sensores que trabajen parte del ultravioleta, visible e infrarrojo cercano, pero en la longitud de onda donde más refleja la energía está en el verde, en el rango del visible. Esto puede deberse a las propiedades químicas del agua en esta zona.

En la figura 3.3 se puede observar que aunque la mayor reflectancia se obtiene en un rango un poco menor (entre 0.3 y 0.6 μm), la reflectancia obtenida es

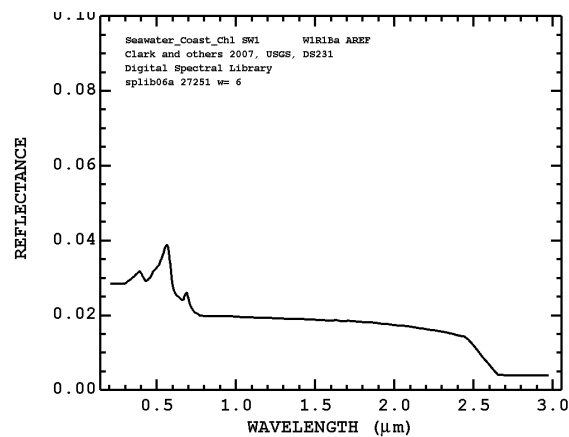


Figura 3.2: Firma espectral de una muestra de agua en una zona paralela a la costa oeste de Estados Unidos. Tomado de la Librería en línea de datos espectrales de USGS. Por Kokaly, R.F. et al. 2017. Geological Survey Data Series.

mucho mayor que en la muestra de la figura 3.2. Es decir, se refleja mucha más energía en este rango, lo que puede deberse también a la composición química del agua, o incluso a la profundidad y tipo de fondo en esta zona. Se observa que la mayor reflectancia se obtiene en los $0.4\mu\text{m}$, esto es, en la banda del azul de la franja del visible.

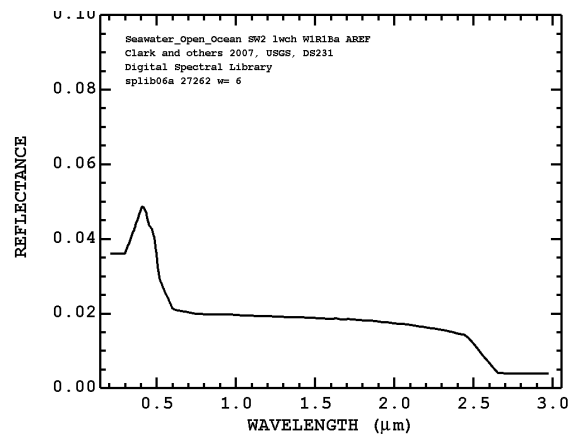


Figura 3.3: Firma espectral de una muestra de agua en mar abierto en el océano Atlántico, al este de los Estados Unidos. Tomado de la Librería en línea de datos espectrales de USGS. Por Kokaly, R.F. et al. 2017. Geological Survey Data Series.

Ahora bien, en el área de estudios costeros, además de conocer la firma es-

pectral del agua, es de gran utilidad conocer la firma espectral de algunos de sus componentes que pueda ser de vital importancia a la hora de reflejar la energía incidente. Es el caso de la materia orgánica presente en la zona de estudio, la profundidad y tipo de terreno del fondo, el tipo de suelo en la zona costera, entre otras características. De esta forma, conociendo la firma espectral de los distintos materiales observados, se puede tener mayor claridad en la información recopilada de las imágenes que se obtenga de los distintos sensores utilizados.

3.2 | Tipo de Fuente de Energía detectada por los Sensores de Medición

El sensor es el instrumento básico en teledetección por medio del cual se detecta la señal electromagnética, que se registra, graba y procesa para la obtención de los datos requeridos.

Las tres formas en las que un sensor podría recibir señales en un sistema de teledetección serían por *emisión* del objeto o de una fuente de energía electromagnética como el sol; *reflexión* de la energía electromagnética por parte de la superficie estudiada; o por *emisión-reflexión*, proceso en el que los mismos sensores producen la energía electromagnética dirigida a la superficie en estudio, siendo reflejada por la misma y nuevamente captada por el sensor.

En cuanto a los sensores utilizados en teledetección, encontramos varias clasificaciones, entre las que cabe mencionar en función del tipo de captador de la señal, *sensores pasivos* y *sensores activos*¹. Dentro de estos se pueden distinguir: los de tipo fotográfico, óptico electrónicos y de antena o microondas, según el procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos (Chuvienco, 1995). Estos sensores se diferencian según la región del espectro donde trabajan (es decir, donde son más sensibles a recibir la señal), en los que trabajan en la región del visible al infrarrojo cercano, los que trabajan en el infra-

¹Posiblemente esta podría ser la principal clasificación.

rojo térmico y los que trabajan en el microondas, como se aprecia en la figura 3.4 (Sobrino, 2000).

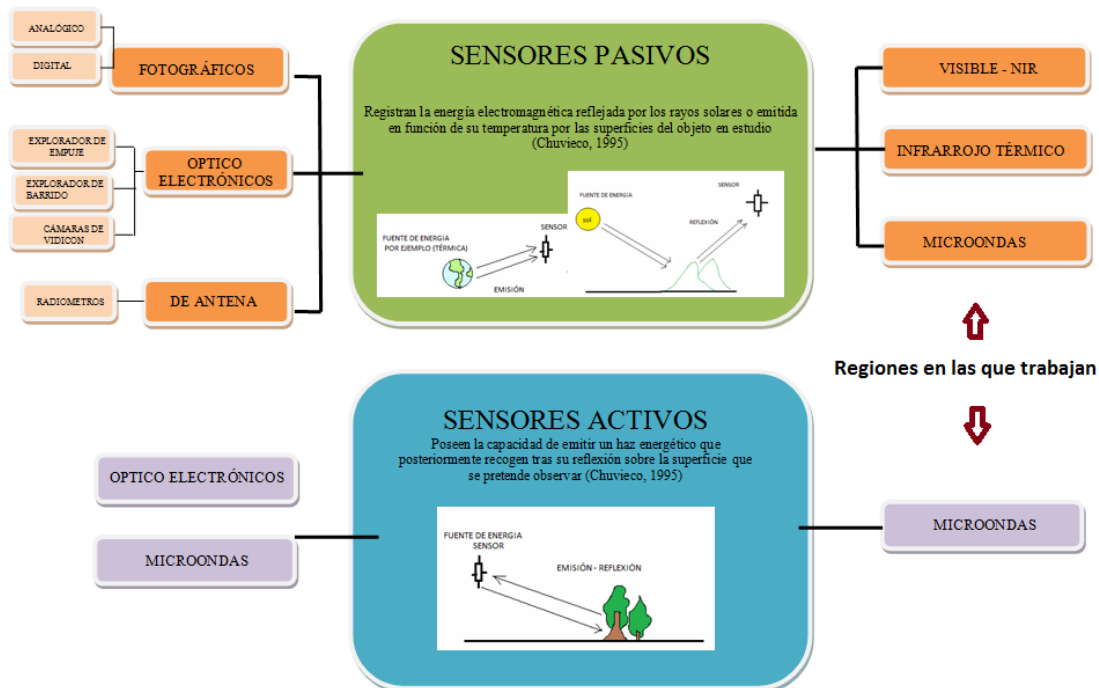


Figura 3.4: Esquema básico de clasificación de sensores utilizados en teledetección.

Otra clasificación que se puede tener en cuenta es dependiendo del producto generado en aquellos sensores *generadores de imagen* y los *no generadores de imagen* (Njoku, 2013).

Los sensores fotográficos también pueden clasificarse según el *número de objetivos* (mono o multibanda, según albergue una o varias bandas del espectro simultáneamente), según el *ángulo de observación* (vertical u oblicua) y según la *altura* (directamente sobre la superficie, aérea, espacial) (Chuvienco, 1995).

Otra clasificación de los sensores electro-óptico sería según el sistema de escaneo. Estos pueden ser *escáneres de barrido*² o *escáneres de empuje*³. Los

²Construyen una imagen bidireccional a través de un espejo móvil que oscila perpendicular a la trayectoria de la plataforma.

³Construyen una imagen bidireccional a través de una serie lineal de detectores – no hay

radiómetros multiespectral de barrido funcionan de forma similar a los espectrómetros de barrido. Entre tanto, los radiómetros multiespectral de empuje difieren de los espectrómetros de empuje, en que estos últimos utilizan una cadena de detectores bidimensional (en lugar de uno lineal como los radiómetros) (Sobrino, 2000).

En las figuras 3.5 y 3.6 se pueden ver de forma más claras estas clasificaciones y algunas aplicaciones (Campbell, 2008; Cracknell and Hayes, 2007; Gupta, 2003; Lillesand et al., 2007; Njoku, 2013; Sobrino, 2000).

3.3 | Tipo de Dato Originado

Según el sensor utilizado, el dato que genera puede ser bidimensional⁴ o puntual⁵. Los datos bidimensionales son una representación digital del objeto de estudio formado a través de las variaciones de energía captada por el sensor. Estas imágenes digitales están formadas por píxeles. Cada pixel representa un valor que corresponde a un nivel de intensidad en una escala de grises. Estos valores son conocidos como número digital (DN). Por lo tanto cada pixel representa la intensidad de energía electromagnética captada por el sensor para una área específica. La medida de dicha área depende de la resolución espacial del sensor.

Las imágenes satelitales pueden clasificarse según la información que recopila en Klemas (2011):

- **Pancromática:** Es una imagen formada por una sola banda espectral. Para los sensores pancromáticos más modernos, esta única banda suele abarcar desde la parte visible al infrarrojo cercano del espectro. Los datos

espejo oscilante- que cubre todo el campo de visión y se mueve perpendicular a la dirección de trayectoria del satélite

⁴En el caso de ser un sensor generador de imagen

⁵En el caso de los no generadores de imagen como los altímetros o magnetómetros

pancromáticos se representan por medio de imágenes en tonos de grises (blanco y negro).

- **Multiespectral:** Imágenes compuestas por datos de unas cuantas bandas de longitudes de onda y separadas entre sí. Los sensores de imágenes multiespectrales capturan imágenes de al menos 2 o más longitudes de onda del espectro electromagnético. Dentro del sensor, cada canal es sensible a la radiación dentro de una banda angosta de longitud de onda, lo que resulta en una imagen multicapa que contiene tanto información espectral como intensidad de luz en cada pixel de la muestra (Keith, 2016).
- **Hiperespectral:** Imágenes compuestas por datos de muchas, continuas y estrechas, bandas de longitudes de onda del EM.

3.4 | Tipos de Plataforma

Autores como Barrett and Curtis (1992); Duzgun and Demirel (2011) han planteado una de las clasificaciones en *Remote Sensing* teniendo en cuenta la altura de la plataforma donde se coloca el sensor que se encarga de captar la señal, las cuales pueden ser terrestre, aérea o espacial.

Las plataformas terrestres pueden ser desde un simple vehículo hasta grúas torres, barcos, etc. Las plataformas aéreas son por lo general aviones que vuelan entre los 0.5km y los 20km de altura, y las plataformas espaciales son aquellas que están a una altitud entre los 250km y los 36.000km sobre la superficie de la tierra.

Destacando las plataformas espaciales, que son las que utilizan los sensores seleccionados en este trabajo de investigación. Teniendo en cuenta, entre otras cosas, la altura de órbita de las plataformas, tenemos la siguiente clasificación:

- **LEO:** por sus siglas en inglés *Low Earth Orbit*. Son órbitas geocéntricas en alturas hasta los 2.000km.

- **MEO: *Medium Earth Orbit*.** Son órbitas geocéntricas que van desde los 2.000km hasta la alturas geosíncronas (aproximadamente los 36.000km).
- ***High Earth Orbit*:** Son órbitas geocéntricas por alturas superiores a las geosíncronas.

Adicionalmente a estas tres clasificaciones de órbitas teniendo en cuenta las alturas de acción, tenemos otras clasificaciones que vale la pena mencionar, ya que algunos satélites de interés en los fenómenos naturales terrestres encajan en dicha clasificación, son destacables:

- **GSO=** Por sus siglas en inglés *Geosynchronous Orbit*, es una órbita circular alrededor de la tierra, cuyo periodo orbital coincide con el periodo diario de rotación terrestre.
- **GEO=** Por sus siglas en inglés *Geostationary Earth Orbit*, obedece a órbitas circulares a una altura de 35.786km sobre la superficie de la tierra, situada sobre el ecuador y que sigue la dirección de la rotación terrestre. Se trata de un caso especial de órbita GSO.
- ***Sun-synchronous Orbit*:** Es aquella en la que el satélite pasa por el mismo punto de la tierra a la misma hora del día.

3.5 | Tipo de Resolución

La habilidad para registrar información detallada en un sistema se conoce como resolución, concepto que implica al menos las siguientes manifestaciones (Chuvieco, 1995):

- **Espacial:** esto corresponde tanto al objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen como a la cobertura de una sola imagen.

- **Temporal:** frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir indica la periodicidad en la que adquiere imágenes de la misma porción de superficie terrestre.
- **Radiométrica:** describe la sensibilidad del sensor en cuanto a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que percibe de los distintos objetos (cantidad de niveles de grises).
- **Espectral:** indica el número y anchura de bandas espectrales que puede discriminar el sensor.

3.6 | Adquisición

Otro aspecto a tener en cuenta es la fuente de adquisición de las imágenes y/o fotografías. Algunas de las imágenes se pueden adquirir a través de organismos gubernamentales, que por lo general, las distribuyen de forma gratuita, o a través de empresas comerciales con el correspondiente costo al usuario. Estas últimas suelen ser de mayor resolución espacial que las de acceso gratuito, igualmente con un alto costo de adquisición por imagen.

Hay muchos portales visores de imágenes satelitales. En algunos, además de visualizar la imagen, permite su descarga gratuita, ya sea porque ellos mismos gestionan las misiones de las que provienen dichas imágenes o porque tienen convenios con dichos organismos. Entre ellos, cabe destacar los siguientes:

- *United States Geological Survey (USGS):* Se trata de la Agencia de Ciencia del Departamento del Interior de Estados Unidos. Entre sus funciones están las de cartografiar terrenos públicos, examinar estructuras geológicas, investigar en temas de agua subterránea, ecosistema, salud ambiental, amenazas naturales, cambio climático y de uso de la tierra (USGS). Gracias al intercambio de información de la USGS con otras instituciones, brinda información a partir de dos herramientas para visualizar y descargar imágenes satelitales, ortofotos e imágenes aéreas, una de ellas es *global visua-*

lization viewer ([GloVIS](#)), que está en funcionamiento desde el 2001. Desde ahí es posible acceder a imágenes satelitales de proyectos tales como Landsat, Aster, EO-1, IRS AWIFS, IRS Liss-3, Orbview-3 y Sentinel-2. La otra herramienta desde donde es posible descargar imágenes satelitales desde USGS, es *earth explorer* ([EE](#)). Ésta contiene una amplia base de datos con información de imágenes aéreas desde 1937 hasta imágenes de satélites que están captando información actualmente. Contiene mucha más información que la encontrada en GloVis. Destacan más de 10 sensores de imágenes aéreas, distintas fuentes de sensores de Modelo de Elevación, además de imágenes de proyectos como Ikonos-2, Orbview-3, EO-1, Landsat, Modis, IRS AWIFS, IRS Liss-3, Sentinel-2, productos Lidar y Radar.

- *National Aeronautics and Space Administrations* (NASA): Agencia de Estado Unidos encargada de la investigación aeronáutica y aeroespacial. [World-view](#) es una aplicación de la NASA que permite visualizar y descargar imágenes globales para el estudio de la tierra proveniente de misiones gestionadas por la NASA u otros organismos que tengan convenio con ella. Esta aplicación ha sido creada dentro del proyecto *Earth Science Data Information System* (ESDIS), entre cuyas funciones está la de procesar, archivar y distribuir los datos de los satélites para el estudio de la ciencia de la tierra de la NASA. Cuenta con una gran variedad de datos relacionados con la tierra, océanos, atmósfera, criosfera, entre otros campos. Otra herramienta proporcionada por la NASA para obtener datos de misiones enmarcadas en el proyecto ESDIS, es [Earth Search](#).
- *U.S National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) Es la agencia de ciencia perteneciente al Departamento de Comercio de los Estados Unidos, enfocada principalmente en la interacción atmósfera y océanos. Esta agencia opera una serie de misiones satelitales para el estudio y monitoreo de características físicas relacionadas con la dinámica atmosférica y oceánica, entre las que destaca la serie *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) en la órbita geoestacionaria y la serie NOAA en la órbita polar. NOAA provee datos de acceso gratuito obtenidos de sus misiones satelitales que monitorizan la tierra. Se puede acceder a ella a través

distintas formas: de acuerdo al producto, satélite origen, o departamento de estudio; uno de ellos es a través del [Centro Nacional de Información de NOAA](#). También posee un Sistema de Biblioteca Online de libre acceso llamado *Comprehensive Large Array data Stewardship System* (CLASS). Así como una web interactiva donde se puede ver y descargar distintos tipos de información llamada *The Data Access Viewer*.

- *Global Land Cover Facility* (GLCF). La universidad de Maryland (EEUU) desarrolló la herramienta *Earth Science Data Interface* [ESDI](#) que distribuye tanto imágenes como información derivada de datos satelitales. La aplicación está enfocada principalmente al estudio de la cobertura terrestre. Se enmarca dentro del proyecto de investigación *Global Land Cover Facility* (GLCF) y ofrece imágenes e información derivada de Landsat, MODIS, AVHRR, ASTER, IKONOS, Quickbird, Orbview.
- Agencia Espacial Europea (ESA): Es la agencia que coordina el programa espacial Europeo, compuesto por 22 países. Entre los satélites lanzados por ESA, dirigidos al monitoreo de la tierra, están: la serie Meteosat, utilizado principalmente para la previsiones meteorológicas, cuyo primer lanzamiento se realizó en 1977; La serie de satélites *European Remote Sensing* (ERS), utilizado en el monitoreo de zonas costeras, hielo polar, velocidades y dirección del viento, temperatura de la superficie del mar, entre otras cosas; la serie *Envisat*, reforzó la información suministrada por la serie ERS, y proporcionó otra acerca de la química atmosférica y procesos biológicos de los océanos; *EarthCare*, el cual es una misión conjunta con Japón para mediciones físicas de los aerosoles y las nubes. ESA ofrece acceso gratuito a las imágenes de los satélites Sentinel 1, Sentinel 2 y Sentinel 3, a través de una interfaz gráfica de usuario llamada *Copernicus open access hub*.
- *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA): Es la Agencia Espacial Japonesa, creada en 2003. Entre los satélites de observación terrestre que operan, está la serie *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS). El primer satélite de la serie fue lanzado en 2006, incorporando tres sensores independientes, que captan imágenes ópticas (con una resolución de 10m) e imágenes Radar. A

través del *Earth Observation Research Center* ([EORC](#)) se puede acceder a las imágenes de alguno de los satélites gestionados por la Agencia (ALOS / ALOS 2).

FOTOGRAFICOS			
De Film fotográfico	Film Blanco y Negro	Pancromática	Trabaja en la zona del visible y ultravioleta.
		Film Infrarrojo	Trabaja desde la zona del visible al infrarrojo cercano.
	Film a color	Color "Normal"	Más ventajoso con respecto al B/N, ya que el ojo humano puede distinguir más tonalidades de colores que los que distingue en tono de grises. Sensibles al color azul, verde y rojo.
		Falso color	Emulsiones sensibles al verde, rojo e infrarrojo del espectro electromagnético.
Digitales	CCD (Charge-coupled device)		Tiene mayor sensibilidad a la luz, mayor calidad de imagen y más costosa.
	CMOS (Complementary – Oxide - semiconductor)		Alta capacidad de manejar grandes cantidades de información.
ELECTRO-OPTICOS			
Generadores de Imagen	Radiómetros Pancromáticos	Sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible.	
	Radiómetros Multiespectrales	Detectan la radiación en varias longitudes de onda, por lo general < 20 bandas. Trabajan en el rango del EM entre el UV y el Infrarrojo térmico.	
	Sensores Hyperspectrales o Espectrómetros de imagen	Producen imágenes cubriendo entre 100 y 200 bandas de poca anchura y contiguas, típicamente entre la región del Visible y del SWIR. Esto permite discriminar más fácilmente los tipos de superficie aprovechando los detalles más finos de las características espectrales.	
	Sensores Térmicos	Detectan la radiación en la franda del Infrarrojo térmico.	
	OTROS	Polarímetros, Generadores de imagen stereo, Generadores de Imagen multiangulo.	
No Generadores de Imagen	Perfiladores (Perfilers or sounders)	Aprovechan las propiedades de una banda espectral característica de una especie de gas particular. Suele operar en el infrarrojo térmico, suelen usarse para medir perfiles verticales de temperatura atmosférica, humedad, ozono, traza de gases, etc.	
	Espectrómetro (Non Imaging)	Aprovechan la huella Espectral de especies ambientales y superficies.	
	Radiómetro (Non Imaging)	Típicamente utilizados para el estudio del balance energético terrestre. Mide niveles de radiación a lo largo del espectro desde el UV al Infrarrojo lejano con una resolución espacial baja.	
DE ANTENA O MICROONDAS			
Generadores de Imagen	Radiómetros de Microondas	Estos sensores funcionan sobre sistemas de barrido perpendicular a la dirección del vuelo.	
No generadores de Imagen	Perfiladores (Perfilers or sounders)	Captan mediciones puntuales continuas convertidas en perfiles .	

Figura 3.5: Clasificación de algunos sensores pasivos

ELECTRO-OPTICOS			
<p>LIDAR (Light Detection and Ranging): Mide el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso de luz y su reflexión por el objetivo.</p>	<p>Perfilómetros Lasers (not imaging)</p>	<p>Lidar Dispersómetro: proporciona información sobre propiedades fundamentales atmosféricas dependiendo del tipo de dispersión en la que se basan (Raman, Rayleigh, Mie, etc).</p> <p>Lidar de absorción diferencial: se analiza el retorno de un láser a diferentes longitudes de ondas para determinar densidad de determinados componentes atmosféricos, así como perfil atmosférico del vapor de agua y temperatura.</p> <p>Lidar Doppler: Mide el el desfase de la luz dispersada por los aerosoles transportados por el viento, permitiendo la determinación de la velocidad del viento.</p> <p>Altimetro Lidar: Proporciona medidas precisas entre una altura de referencia y localizaciones concretasen la superficie terrestre.</p> <p>Lidar de Fluorescencia: transmite una frecuencia espectral (opera en la región del UV) que es absorbida por las especies de interés y luego irradiada a una frecuencia distinta, la cual es detectada en órbita por un radiómetro.</p>	
	<p>Lidar scanner (generadores de imágenes)</p>	<p>Sistema compuesto por el scanner laser, GPS (para la localización X, Y, Z del sensor) y IMU (Inertial Measurement Units- para medir la orientación angular del sensor con respecto al objetivo). Utilizados para los modelos digitales de elevación.</p>	
DE ANTENA O MICROONDAS			
<p>RADAR (Radio Detection and Ranging): Envía microondas artificiales en una dirección determinada, chocando con los objetos y siendo dispersados por los mismos. La energía dispersada se recibe, amplifica y analiza para determinar la localización y propiedad</p>	<p>No Generadores de Imagen</p>	<p>Radar Altimetro</p>	<p>Transmite pulsos de microondas al objeto y mide el tiempo de vuelta de la señal para determinar la distancia del objeto al sensor.</p>
		<p>Radar Dispersometro</p>	<p>Se utiliza para realizar medidas precisas de la cantidad de energía retrodifundida de los objetos, la cual depende de la rugosidad de la superficie</p>
	<p>Generadores de Imagen</p>	<p>SLAR (Side Looking Airborne Radar)</p>	<p>Radar Lateral Aereo, utilizados en plataformas aereas, es un radar cuya antenna barre lateralmente el terreno (perpendicular a la línea de desplazamiento y oblicuo al terreno).</p>
		<p>SAR (Synthtetic Apertura Radar), utilizado principalmente en plataformas espaciales</p>	<p>Radar de Apertura Sintética, se registran los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria, con lo que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia .</p>
<p>Otros</p>	<p>Plataformas terrestres</p>	<p>Utilizados en estudios de estados de mar: Sistemas de Línea de visión directa, Sistemas de Ondas de Superficie, Sistemas de Ondas Ionosféricas.</p>	

Figura 3.6: Clasificación de algunos sensores activos

Zonas de Estudio y Datos

Solo cuando la mente está libre de ideas y creencias, puede actuar correctamente.

Jiddu Krishnamurti.

RESUMEN: En este capítulo se hace una breve descripción de las zonas de estudio seleccionadas para la aplicación de la metodología de detección automática de la LC utilizando dos índices espectrales propuestos que se describirá en los capítulos posteriores. De igual forma, se hace una descripción de los datos seleccionados tanto para aplicar como para validar la metodología propuesta.

4.1 | Descripción de las Zonas de Estudio

Muchos de los principales y más importantes deltas del mundo albergan grandes áreas de asentamientos urbanos así como zonas destinadas a la agricultura, pesca, y actividades industriales. Por ello, presentan gran importancia ambiental, económica y social (Ranasinghe et al., 2019; Syvitski, 2008), como se ha resaltado en el Capítulo 1. Las zonas deltaicas corresponden a menos del 1%

de la cobertura terrestre global y están habitados por alrededor del 4.1% de la población mundial (Edmonds et al., 2017). Debido a su gran importancia y vulnerabilidad frente a los impactos negativos del calentamiento global, relacionados principalmente con el aumento del nivel de mar, se hace imprescindible su estudio en distintas escalas (Da Lio and Tosi, 2019; Fatorić and Chelleri, 2012). En esta Tesis Doctoral se han elegido tres deltas de gran relevancia en España para aplicar la metodología propuesta para la detección de LC con el fin de realizar investigaciones posteriores multitemporales.

Las zonas de estudio fueron seleccionadas por el volumen de información disponible, las condiciones micro-mareales a las que están expuestas, la similitud climática y morfológica y los trabajos previos desarrollados por distintos investigadores. Las oscilaciones mareales en estas zonas suelen ser pequeñas, en el delta del Ebro, el máximo rango mareal es alrededor de los 0.25m (Jiménez et al., 1997) y tanto en el delta del Guadalfeo como en el delta del Adra no excede 1.0m (Jabaloy-Sánchez et al., 2010; Jabaloy-Sanchez et al., 2014), siendo lo habitual valores no superiores a 0.6m. Como se ha mencionado, han sido ampliamente estudiados en publicaciones anteriores debido a su gran importancia y complejidad morfodinámica (Bergillos et al., 2015, 2016b; Castelltort et al., 2018; Felix et al., 2012; Lique et al., 2005; Mendes et al., 2015; Rodríguez-Rodríguez et al., 2011; Sanchez-Arcilla et al., 1998; Zografos, 2017). Por otra parte, en las tres zonas el aporte de sedimentos fluviales ha mermado de forma substancial a partir de la construcción de presas a lo largo del cauce del cada uno de los ríos, modificando su comportamiento morfodinámico.

4.1.1 | Delta del Río Guadalfeo

La cuenca hidrográfica del río Guadalfeo tiene un área aproximada de 1252km², que forma un rectángulo irregular y drena directamente al mar Mediterráneo (Jabaloy-Sanchez et al., 2014). La cuenca se encuentra limitada principalmente al norte por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra de la Contraviesa y la Sierra de Lujar. La sedimentología en la cuenca consiste en una gran cantidad de depósitos neogeno-cuaternarios con una amplia variedad de tamaños (Jabaloy-

Sanchez et al., 2014). Muchos de los deltas del Mediterráneo, excepto los del Nilo, Po, Ródano y Ebro, son alimentados por cuencas de escorrentía relativamente pequeñas caracterizados por una fuerte estacionalidad, altas pendientes y por aporte de sedimentos abundantes y de tamaño de grano grueso (Maldonado, 2008). De acuerdo con Liquete et al. (2005), el régimen de descarga de sedimentos y agua en la cuenta Mediterránea Andaluza están controladas no solo por los patrones regionales climáticos, incluyendo una marcada variabilidad estacional, sino también por la orografía de las cuencas fluviales dominadas por las pendientes pronunciadas.

El actual recorrido del río Guadalfeo está localizado entre Punta del Santo (cerca de la antigua localización de la desembocadura del río en 1943) y el Peñón de Salobreña (Bergillos et al., 2016b). La planicie deltaica esta delimitada por el Peñón de Salobreña al oeste y el puerto de Motril por el este (Bergillos et al., 2015; Jabaloy-Sanchez et al., 2014). Teniendo en cuenta la distribución del suelo en esta área, el principal uso del suelo está dedicado a cultivos subtropicales, caña de azúcar y a la horticultura. Sin embargo, un pequeño porcentaje del terreno está dedicado al uso de invernaderos (Pérez Campaña and Valenzuela Montes, 2014), particularmente entre el este del río y el puerto de Motril.

La cuenca del río Guadalfeo tiene un clima Mediterráneo tropical con una precipitación promedia anual de 586mm (Jiménez-Sánchez et al., 2008). Se puede encontrar sedimentos de diferentes tamaños y niveles de gradación y mezcla debido a la fuerte pendiente topográfica (Millares et al., 2014). A consecuencia de esto, la distribución granulométrica en la costa es particularmente compleja y con proporciones variables de arena y grava (Bergillos et al., 2016a). Las tres fracciones predominantes son: 0.25-0.5 mm (arena), 2-8 mm (grava fina) y 8-32 mm (grava gruesa) (Bergillos et al., 2015).

Con respecto al clima marítimo, las costas del Mar de Alborán están sujetas a niveles de energía de oleaje de baja a moderada y a condiciones micromareales (rango de marea aproximadamente de 0.5m). El área de estudio está sometido al paso de tormentas extratropicales del Atlántico y Mediterráneo (Quevedo et al.,

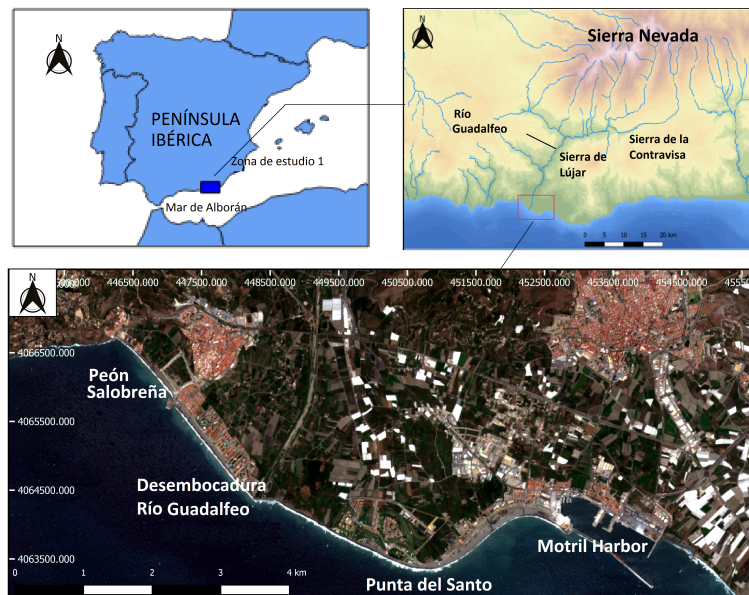


Figura 4.1: Mapa de localización del delta del Guadalfeo.

2008). El oleaje más energético proviene de las direcciones oeste, oeste-suroeste, suroeste, este-sureste y este. Este oleaje es oblicuo con respecto a la alineación de la LC (Ortega-Sánchez et al., 2014).

4.1.2 | Delta del Río Adra

El río Adra es el quinto más largo del sistema de ríos del Mediterráneo Andaluz, cuya cuenca tiene un área de 750.7km² (Liquete et al., 2005). Está localizada al sureste de España, limitada por la Sierra de Gador al este y la Contraviesa al oeste (Mendes et al., 2015).

El clima es de tipo semiárido tropical Mediterráneo, con una temperatura promedio anual de 18°C y una precipitación promedio anual de alrededor de 300mm (Rodríguez-Rodríguez et al., 2011). La descarga fluvial del río Adra, una descarga promedio de 1m³/s Liquete et al. (2005), es una de las más altas en comparación con la de otros ríos Mediterráneos. Además cuenta con la característica de tener la presencia de agua durante todo el año a diferencia de otros ríos en la región que solo tienen descargas durante épocas de tormentas,

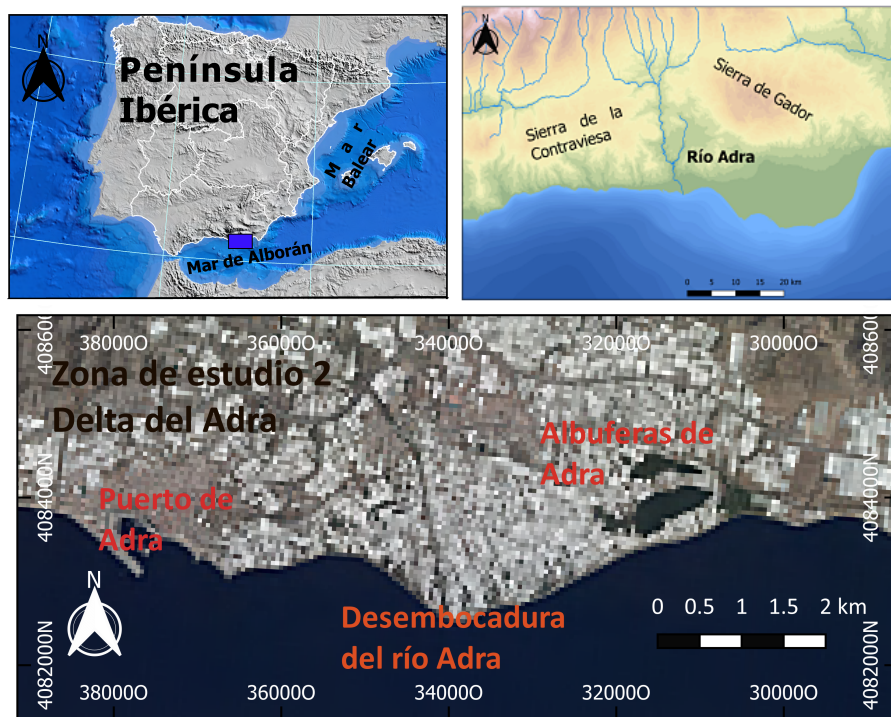


Figura 4.2: Mapa de localización del delta del Adra.

y sequía durante los meses de verano (Jabaloy-Sánchez et al., 2010). La cuenca del río posee una pronunciada pendiente longitudinal, con relieves escarpados o semiescarpados. El abanico deltaico está caracterizado por arenas, limos, arcillas, gravas y cantos (Junta de Andalucía, 2015).

La dirección de oleaje predominante es del este y del oeste-sureste. La dirección del oeste-sureste es ligeramente más energética que la del este y el oleaje del este es ligeramente más frecuente que las olas provenientes del oeste. El área está sujeta a condiciones micro-mareales (que usualmente no exceden 1.0m de altura) (Jabaloy-Sánchez et al., 2010).

En ambos lados del río, el principal uso del suelo está dominado por la agricultura de invernaderos (Rodríguez-Rodríguez et al., 2011). En el lado sureste está localizado el humedal costero más importantes del sureste de España, compuesto por dos pequeñas lagunas (<0.5Km²) (De Vicente et al., 2003), ambas

protegidas por acuerdos internacionales desde 1994 (Áreas protegidas por la Convención de Ramsar).

4.1.3 | Delta del Río Ebro

La cuenca del río Ebro está localizada en el noreste de la Península Ibérica, y cuenta con una superficie de 85,362km². Se encuentra delimitada por los Pirineos al norte, la cordillera Cantábrica al noroeste, el sistema montañoso ibérico al sur y suroeste y la cordillera prelitoral Catalana al este (Castelltort et al., 2018).

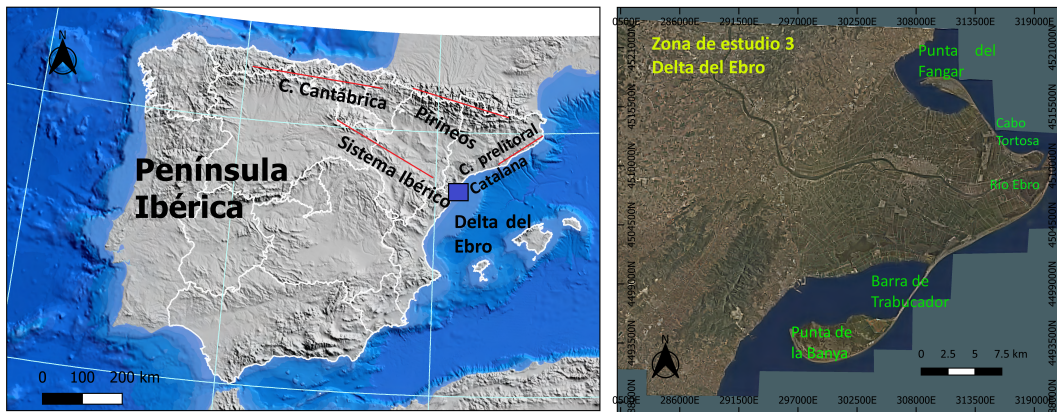


Figura 4.3: Mapa de localización del delta del Ebro.

El delta del Ebro está localizada a 200km al sur de Barcelona (España). Su superficie sub-aérea es de aproximadamente 320km (Sanchez-Arcilla et al., 1998) y la LC tiene aproximadamente unos 50km de longitud (Lavoie et al., 2014). Durante las últimas décadas, ha sufrido cambios debido, principalmente, a la construcción de diques que han originado la disminución de aportes de sedimentos del río. Esto, combinado con los procesos de oleaje, ha dado como resultado un cambio drástico en la forma del delta (Jiménez et al., 1997; Sanchez-Arcilla et al., 1998; Zografos, 2017).

Actualmente, los procesos costeros en el delta son dominados principalmente por la acción de oleaje y tormentas (Jiménez and Sánchez-Arcilla, 1993; Palanques and Guillen, 1998) con un rango mareal alrededor de 0.25m (Jiménez et al., 1997). Esta zona está caracterizada por una altura de ola significativa promedio

de alrededor de 0.8m y un periodo máximo promedio de 4s. Las direcciones predominantes de oleaje corresponden a las del este, sur y noroeste, siendo el oleaje proveniente del este el más energético (Lavoie et al., 2014).

Más de la mitad de la planicie deltaica es utilizada para la agricultura, principalmente para cultivos de arroz (Mikhailova, 2003; Sanchez-Arcilla et al., 1998). El resto del área está compuesto por pantanos, lagunas y humedales, playas de arena, canales y carreteras (Fatorić and Chelleri, 2012; Mikhailova, 2003). Se trata de un ambiente ecológico altamente valioso, que se encuentra protegido por regulaciones internacionales como la Convención de Ramsar y la red Natura 2000 (Alvarado-Aguilar et al., 2012).

4.2 | Descripción de los Datos Utilizados

4.2.1 | Imágenes Satelitales Multiespectrales - Proyecto Landsat

Desde 1972 la serie de Satélites Landsat ha venido suministrando información valiosa a través de las imágenes que proporciona del planeta. El primer satélite Landsat 1 fue lanzado al espacio el 23 de Julio de 1972. Con esto inicia una de las más amplias bases de datos de imágenes satelitales multiespectrales alrededor del mundo. Actualmente, de los 8 satélites lanzados hasta el momento, sólo Landsat 7 y 8, continúan operativos.

Los satélites Landsat 4 y 5 utilizaron sensores como el *multispectral scanner* (MSS) de las mismas características que los utilizados en Landsat 1, 2 y 3. El MSS era un tipo de sensor pasivo, constituido por un equipo óptico-mecánico de barrido lineal, que captaba las imágenes de forma perpendicular al trazado orbital. Este sensor aportaba información en 4 bandas espectrales (excepto el utilizado en Landsat 3, que captaba información en una banda adicional). Adicionalmente, abordo de estos satélites se utilizaron otros sensores como el *thematic mapper* (TM), que al igual que el MSS, es un sensor óptico-

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas de los sensores utilizados para obtener las imágenes de la investigación.

Satélite/ Sensor	Altura Orbita (km)	Frecuencia (días)	Características						
			Bandas Landsat	B1	B2	B3	B4	B5	B7
4,5 / TM	705	16		0.45-0.52	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.90	1.55-1.75	2.08-2.35
			Región espectro EM (μ m)	Azul	Verde	Rojo	Infrarrojo cercano	Infrarrojo medio (SWIR 1)	Infrarrojo medio (SWIR 2)
			Resolución espacial	30m					
7 / ETM+	705	16		0.45-0.52	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.90	1.55-1.75	2.09-2.35
			Región espectro EM (μ m)	Azul	Verde	Rojo	Infrarrojo cercano	Infrarrojo medio (SWIR 1)	Infrarrojo medio (SWIR 2)
			Resolución espacial	30m					
8 / OLI	75	16		0.45-0.51	0.53-0.59	0.64-0.67	0.85-0.88	1.56-1.65	2.09-2.35
			Región espectro EM (μ m)	Azul	Verde	Rojo	Infrarrojo cercano	Infrarrojo medio (SWIR 1)	Infrarrojo medio (SWIR 2)
			Resolución espacial	30m					

mecánico de barrido, pero mucho más avanzado. Fue diseñado para alcanzar mayor resolución espacial, mayor separación espectral, mayor exactitud y resolución radiométrica que el MSS. En los sensores MSS utilizados en Landsat 4 y 5, se utilizaron las mismas bandas que en Landsat 1, 2 y 3 con una resolución espacial de 79m remuestreado a 60m. Para el caso del sensor TM, las bandas en las que trabajaba eran la del azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio 1 y 2, y la banda del infrarrojo térmico, con una resolución espacial de 30m.

El satélite Landsat 7 lleva a bordo el sensor *enhanced thematic mapper plus* (ETM+), sucesor del TM utilizado en Landsat 4 y 5. Las mejoras de este sensor radican en una banda adicional pancromática con una resolución de 15m. Las demás mantienen la resolución de 30m como su predecesor y el perfeccionamiento del sistema de calibración radiométrica de los sensores. Las bandas en las que trabaja este sensor son la del azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio 1 y 2, térmica y pancromática.

Finalmente, el último satélite lanzado, el Landsat 8, lleva a bordo dos sensores; uno de ellos es el *operational land imager* (OLI), un sensor de barrido que emplea un plano focal con largos módulos de detectores fotosensibles (Irons et al., 2012). Cuenta con algunas mejoras respecto de los sensores de los satélites anteriores, como es la adición de dos bandas espectrales nuevas, un canal en la banda del azul y un nuevo canal en el infrarrojo. También, los archivos son muchos mas grandes que los datos de Landsat 7, debido a las bandas adicionales y el aumento del formato a 12-bits (U.S. Geological Survey, 2016). Éste capta datos por medio de 9 bandas que cubren desde el visible hasta el infrarrojo (banda costera/aerosoles, azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio 1 y 2, banda pancromática y banda cirrus). La banda pancromática tiene una resolución espacial de 15m, las demás bandas tienen una resolución de 30m. El otro sensor a bordo es el *thermal infrared sensor* (TIRS) que capta información en las 2 bandas de longitud de onda larga, bandas térmicas 1 y 2, con resoluciones espaciales de 100m.

Las imágenes utilizadas para esta investigación provienen de los sensores

ópticos TM, ETM+ y OLI, escogidos por la mejor resolución espectral y espacial que ofrecen en comparación con los otros sensores utilizados a bordo de satélites como el MSS y el *returned beam vidicom* (RVB) (Townsend, 1987). Las imágenes han sido descargadas desde la aplicación desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), [Earth Explorer](#), una herramienta online desarrollada para buscar, visualizar y descargar imágenes satelitales de distintas fuentes y de forma gratuita. La descarga se realizó en formato Geotiff, bajo el Sistema Mundial de Referencia (WGS84), proyectadas en el Sistema Transversal de Mercator UTM (zona 30N para el delta del Guadalfeo y Adra, y 31N para la zona del delta del Ebro). El nivel de procesamiento de los datos corresponde a los productos de mayor calidad suministrados por el proyecto Landsat, esto significa que han sido previamente calibrados radiométricamente y ortorectificados con una precisión de georegistro de raíz del error cuadrático medio (RMSE) < 0.4 pixel (U.S. Geological Survey, 2016).

Antes de realizar el correspondiente pre-procesamiento de las imágenes, es necesario organizar y seleccionar aquellas que son de utilidad para el estudio. Esto puede resultar en una tarea engorrosa, dependiendo de la cantidad de imágenes a utilizar. En estudios donde se utilicen pocas imágenes no será tan evidente como en el caso de estudios multitemporales en donde se podrían llegar a utilizar más de 100 imágenes de una misma zona, lo que redundaría en un alto costo computacional y de tiempo para el investigador. Por lo tanto, un paso previo es seleccionar las imágenes que van a ser analizadas de acuerdo con un criterio preestablecido.

El primer criterio utilizado ha sido la selección de las bandas espectrales, ya que no es necesario procesar todas las que son descargadas de cada imagen (entre 8 y 11 bandas dependiendo del sensor), sino las requeridas de acuerdo a la metodología utilizada (Índice espectral de agua - *Water spectral index*), es decir se procesarán solo las bandas azul, verde, rojo, infarrojo cercano e infarrojo medio 1 y 2.

El segundo criterio tuvo que ver con el porcentaje de nubes: Se seleccionaron

las imágenes que no tuvieran nubes en las zonas de estudio.

Y el tercer criterio es el tipo de dato, es decir, el correspondiente al nivel de procesamiento de los datos. Según la clasificación dada por la servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), podrían ser productos de nivel 1 de precisión y corrección de terreno (L1TP), producto solo con corrección de terreno (L1GT) y productos de corrección sistemática (L1GS). Para este estudio, fueron seleccionadas las imágenes tipo L1TP, que son el producto de más alta calidad en los datos de la colección Landsat (U.S. Geological Survey, 2016). Los datos usados en esta investigación tienen un error cuadrático medio geométrico menor a 9m (RMSE). EL RMSE (estimación de la precisión de ajuste de los datos) evalúa la fiabilidad de ajuste entre los puntos de control usados por USGS y los puntos de control en terreno (GPC) de la base de datos. El valor de RMSE puede ser encontrado en el archivo MTL de cada imagen. En la tabla 4.1 se pueden observar algunas características de los sensores y las respectivas bandas seleccionadas.

Tabla 4.2: Set de imágenes analizadas.

Zona de estudio	Sensor	Imágenes descargadas	Imágenes seleccionadas	Subtotal
Guadalfeo	TM	72	51	264
	ETM+	172	149	
	OLI	68	64	
Adra	TM	72	61	172
	ETM+	172	50	
	OLI	68	61	
Ebro	TM	58	45	185
	ETM+	130	104	
	OLI	54	36	

En la tabla 4.2 se puede ver la diferencia entre el total de imágenes descargadas disponibles en la zonas de estudio entre las fechas escogidas y aquellas que finalmente fueron seleccionadas teniendo en cuenta los criterios anteriormente descritos. En total fueron seleccionadas 621 imágenes (264 para la zona

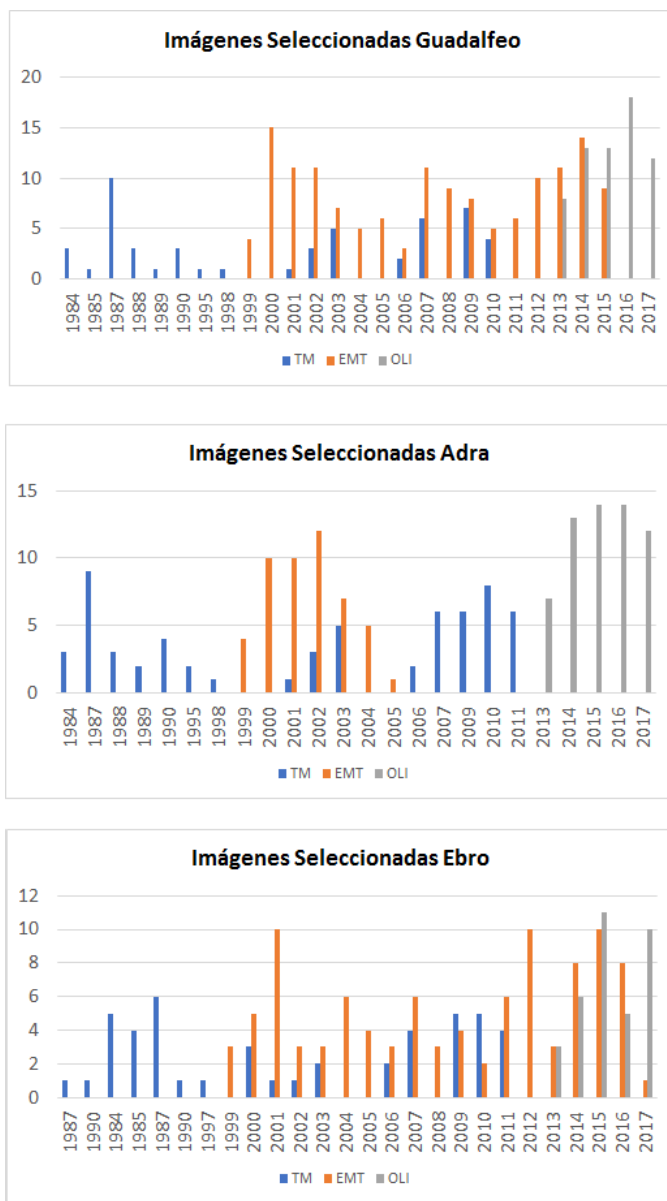


Figura 4.4: Distribución de las imágenes seleccionadas por fecha y sensor para cada zona de estudio.

del delta del Guadalfeo, 172 para el delta del Adra y 185 para el delta del Ebro) a lo largo de los últimos 30 años. En la figura 4.4 se puede ver la distribución de la frecuencia anual de las imágenes seleccionadas en cada sensor, para cada zona de estudio.

4.2.2 | Datos de Alta Resolución

Con el fin de evaluar la precisión de la metodología a partir de un análisis geométrico, se utilizaron datos de alta resolución. Destacan los datos de campo a partir de un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) y las imágenes aéreas y/o satelitales con alta resolución espacial. Se realizó una búsqueda de información disponible y de libre acceso que coincidiera con fechas de las imágenes Landsat seleccionadas. Se encontró poca información que cumpliera con estos parámetros (en las mismas fechas o lo más cercano posible).

Tabla 4.3: Fechas de adquisición de los datos utilizados para la validación de la metodología.

Zona de Estudio	Datos de alta resolución		
	Imágenes Landsat	Datos DGPS	Orthophoto
Guadalfeo	18-Jul-2010		Jul-2010
	23-May-2013		May-2013
	25-Oct-2014	17-Oct-2014	
	12-Dec-2014	11-Dec-2014	
	6-Feb-2015	6-Feb-2015	
Adra	18-Jul-2010		6-Jul-2010
	23-May-2013		13-Jun-2013
	2-Jul-2016		22-Jun-2016
Ebro	13-Aug-2007		21-Aug-2007
	20-Jun-2008		22-Jun-2008
	15-Jun-2012		22-Jun-2012

Para validar los resultados obtenidos en el delta del río Guadalfeo, se compararon las líneas de costa extraídas con la metodología propuesta a dos imágenes Landsat con imágenes aéreas que brindan una resolución espacial de 0.5 m/pixel. Estas imágenes fueron proporcionadas por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (España) (de Andalucía, 2009). Y las líneas de costa detectadas en otras tres imágenes Landsat fueron comparados con los datos de campo recopilados con DGPS con menos de 2cm de error instrumental (Bergillos et al., 2017). En el caso de las zonas en los delta del río Adra y Ebro, los resultados a partir de tres imágenes Landsat (en cada caso) fueron comparados

con los extraídos a partir de ortofotos con una resolución espacial de 0.5m/pixel proporcionados por el centro nacional de información geográfica (CNIG) de España.

La tabla 4.3 muestra la información de las fechas de adquisición de los distintos datos utilizados para la validación de la metodología en las tres zonas analizadas.

Nuevo Índice Espectral

*La verdadera ciencia enseña,
por encima de todo,
a dudar y a ser ignorante.*

Miguel de Unamuno.

RESUMEN: En este capítulo se describe la evolución de los índices espectrales en relación con la detección de cuerpos de agua mediante imágenes de satélite. Posteriormente, se expone el proceso de análisis realizado para plantear los nuevos índices espectrales desarrollados en esta investigación.

5.1 | Antecedentes de los Índices Espectrales

Los índices espectrales han sido ampliamente utilizados en el procesamiento de imágenes satelitales para la detección de cuerpos de agua (Al-mansoori and Al-marzouqi, 2016; Fisher et al., 2016; Liu et al., 2017; Maglione et al., 2014; Ouma and Tateishi, 2006) debido a su sencillez, bajo coste de aplicación y relativamente alta precisión (Jiang et al., 2014). Por lo general, el método consiste en calcular un ratio, pixel a pixel, entre dos bandas distintas de la imagen, que distinga píxeles identificados como agua de aquellos correspondientes a zonas de otro tipo

de cobertura, como construcciones, vegetación, etc. También se definen índices espectrales obtenidos de forma simple a través de operaciones aritméticas entre los datos de cada banda, como ocurre con el propuesto por Feyisa et al. (2014) y Fisher et al. (2016). Algunos de los índices utilizados en la literatura así como metodologías basadas en operaciones multibandas se encuentran listados en la tabla 5.1.

Los índices espectrales que usualmente se utilizan para extraer la LC a partir de imágenes satelitales están basados en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El índice NDVI fue propuesto por Rouse (1973) y consiste en calcular el ratio entre la resta y la suma de las reflectancias de las bandas del infrarrojo cercano y la banda del rojo ($\text{Banda NIR} - \text{Banda Rojo} / \text{Banda NIR} + \text{Banda Rojo}$). En las últimas décadas ha sido el más utilizado en el estudio de la vegetación a partir de imágenes satelitales de distintos sensores (Elmore et al., 2000; Gupta et al., 2000; Roderick et al., 1996), ya que la clorofila de las plantas absorbe la radiación electromagnética principalmente en las bandas del rojo y el azul, mientras que gran parte de la energía es reflejada o dispersada en el banda del infrarrojo cercano (Sonwalkar et al., 2010).

Posteriormente, Gao (1996) propone un nuevo índice que toma como referencia el NDVI. El llamado índice de agua de diferencia normalizado (NDWI), utiliza la banda del infrarrojo de onda corta 1 (SWIR1) en lugar de la banda del rojo propuesto en el de Rouse (1973), y su cálculo sería el siguiente: $\text{Banda NIR} - \text{Banda SWIR1} / \text{Banda NIR} + \text{Banda SWIR1}$. El NDWI propuesto por Gao (1996) es una medida de las moléculas de agua presente en la copa de los árboles que interactúan con la energía electromagnética. Mejora la precisión para extraer información sobre el contenido de agua en la vegetación, siendo, además, menos sensible al efecto de dispersión atmosférica que el índice NDVI (Gao, 1996), lo que resulta ventajoso al trabajar con técnicas de detección remota.

Siguiendo esta línea de estudio, extrayendo información física de imágenes satelitales a partir de índices espectrales, McFeeters (1996) propone uno de los más utilizados para detectar cuerpos de agua. Este fue desarrollado para de-

Tabla 5.1: Algunos de los índices utilizados para detección de cuerpos de agua a partir de imágenes multiespectrales. ρ indica valores de número digital (DN) o de reflectancia en las distintas bandas propuestas para cada índice.

Index	Formula
TCW (Crist, 1985)	$0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$
NDWI (McFeeters, 1996)	$\frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}}$
NDX (Rogers and Kearney, 2004)	$\frac{\rho_{Red} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Red} + \rho_{SWIR1}}$
MNDWI (Xu, 2006)	$\frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}}$
	$NDWI_1 = \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{SWIR1}}$
	$NDWI_2 = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Green}}{\rho_{NIR} + \rho_{Green}}$
NDWI (Ouma and Tateishi, 2006)	$NDWI_3 = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}}$
	$NDWI_4 = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{Green}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}}$
	$NDWI_5 = \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{Green}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{Green}}$
NDPI (Lacaux et al., 2007)	$\frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{Green}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}}$
AWEI (Feyisa et al., 2014)	$AWEI_{fish} = 4(\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) - (0.25\rho_{NIR} + 2.75\rho_{SWIR2})$ $AWEI_{slt} = \rho_{Blue} - 2.5\rho_{Green} - 1.5(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0.25\rho_{SWIR2}$
WI (Fisher et al., 2016)	$1.7204 + 171\rho_{Green} + 3\rho_{Red} - 7\rho_{NIR} - 45\rho_{SWIR1} - 71\rho_{SWIR2}$

linear características en aguas abiertas mientras elimina la presencia de suelo y vegetación. Utiliza la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) de las bandas del verde y el infrarrojo cercano. Sin embargo, se ha visto que las detecciones con este índice arrojan errores en zonas con construcciones alrededor (Rokni et al., 2014). Posteriormente, Xu (2006) propone el índice de agua de diferencia normalizado modificado (MNDWI), que utiliza la banda del infrarrojo medio (SWIR1) en lugar del infrarrojo cercano (NIR). De esta forma mejora la reducción de sombras en áreas cercanas a zonas urbanas (Zhai et al., 2015). Otro índice comúnmente utilizado es índice de extracción automática de agua (AWEI) propuesto por Feyisa et al. (2014). Éste tiene dos versiones: AWEI_{sh}, que ha sido propuesto para remover los pixeles que no pertenecen a cuerpos de agua, incluyendo las superficies de construcciones oscuras en áreas con fondo urbano. Y AWEI_{sh} que se utiliza cuando el anterior no es tan eficiente para remover pixeles en dónde influyen las sombras.

Aunque estos índices espectrales están siendo ampliamente utilizados para detectar sistemas de agua superficial (lagos, ríos, zonas costeras) (Gilmore and Saleem, 2015; Ouma and Tateishi, 2006; Sarp and Ozcelik, 2016; Zhou et al., 2017), aún queda mucho por profundizar en esta área de conocimiento, ya que la efectividad en la detección de tales índices suelen depender del tipo de cobertura alrededor de la zona de estudio, debido al comportamiento espectral de las mismos (Huang et al., 2018). Por ello, se hace esencial profundizar en la definición de índices espectrales que puedan ser usados en un amplio rango de zonas de estudio.

Otro aspecto clave a tener en cuenta en la utilización de los índices espectrales es la adecuada selección de umbral para definir los pixeles correspondientes a agua y aquellos que no lo son (Campos et al., 2012; Huang et al., 2018). En ello, nuevamente juega un papel importante el comportamiento espectral del tipo de cobertura alrededor del cuerpo de agua a identificar. Indistintamente del tipo de cobertura que se encuentre alrededor del cuerpo de agua, lo que es común a todos es el comportamiento espectral del agua; si bien, las magnitudes de reflectancias pueden variar de acuerdo a las características físico-químicas del

agua (Zeng et al., 2017), en general, hay que encontrar un componente común en tal comportamiento espectral. En la siguiente sección se realiza un análisis espectral de las tres zonas de estudio para corroborar la hipótesis planteada en esta investigación.

5.2 | Propuesta de los Nuevos Índices Espectrales

Los nuevos índices propuestos en esta investigación para identificar la LC están basado en la premisa de que la firma espectral del agua en la banda del azul y el verde es considerablemente diferente a la del comportamiento espectral en la banda del infrarrojo medio (SWIR2), en zonas de vegetación y otros tipos de suelo como el de las playas. De acuerdo con Chuvieco (2008), por lo general, la reflectancia del agua es mucho mayor en la región VIS y decrece a medida que la longitud de onda aumenta, lo cual significa que la reflectancia del agua se aproxima a cero en las regiones de NIR y SWIR, al contrario que los suelos y la zona de vegetación, cuya reflectancia se incrementa significativamente. Teniendo en cuenta el comportamiento espectral del agua, se propone sacar ventaja de su mayor reflectividad en la banda del azul y del verde, en contraste con su comportamiento espectral en el infrarrojo de onda corta 2 (SWIR2), dónde es prácticamente nula.

Para corroborar la hipótesis anteriormente planteada se han analizado las firmas espectrales de una muestra representativa, asumiendo como población de estudio el total de imágenes seleccionadas en las tres zonas (Delta del Guadalfeo, Adra y Ebro). El tamaño de la muestra se calculó con la siguiente expresión:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * \sigma^2}{d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * \sigma^2} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

donde,

N = Tamaño de la población.

σ = Desviación estándar de la población. En caso de desconocer el valor se suele utilizar un valor constante igual a 0.5

Z_{α} = Valor obtenido mediante niveles de confianza. Para un nivel de confianza del 95%, el valor de esta variable es de 1.96

d = Límite aceptable de error muestral. Para investigaciones el valor estándar es de 5%.

Teniendo en cuenta el tamaño de la población estudiada como el total de imágenes seleccionadas (621), y los valores de los parámetros descritos anteriormente; el tamaño representativo de la muestra para la población de estudio en esta investigación es de 238. La distribución de la muestra representativa según las zonas de estudio y sensores escogidos se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Distribución del número de muestra representativa de acuerdo a la zona de estudio y tipo de sensor.

Zona de estudio	Sensor	Imágenes Seleccionadas	Muestra Representativa
Guadalfeo	TM	51	19
	ETM+	149	58
	OLI	64	24
Adra	TM	61	22
	ETM+	50	20
	OLI	61	22
Ebro	TM	45	17
	ETM+	104	39
	OLI	36	14

Se seleccionaron aleatoriamente el número de imágenes según la muestra representativa para cada zona y cada sensor. A continuación se procedió a calcular las firmas espectrales de las mismas¹ con el software sistema de información geográfica de software libre (QGIS) y *plug-in* de clasificación semi-

¹Teniendo en cuenta la dispersión que presenta la banda del azul, el análisis se realizó con

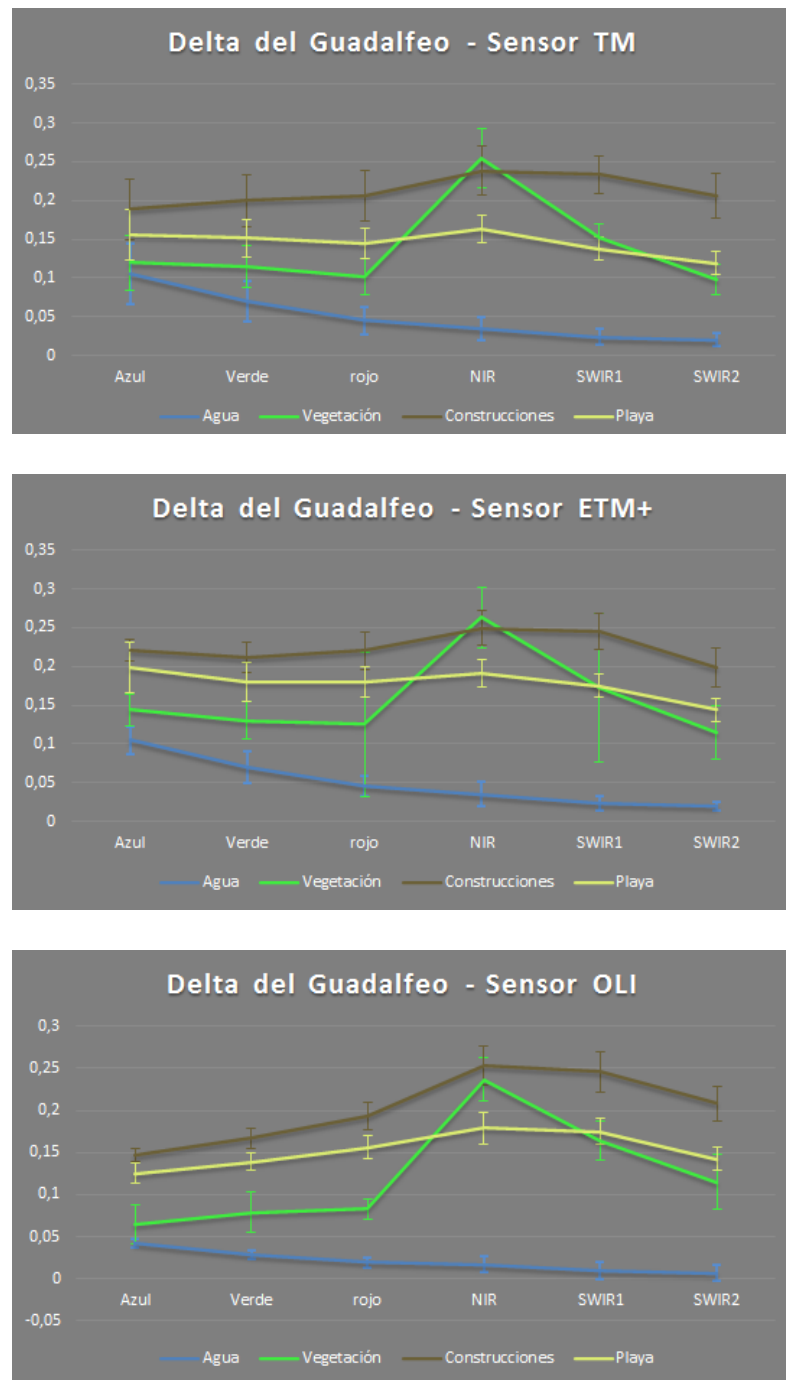


Figura 5.1: Media y desviación estándar de las firmas espectrales de las principales coberturas analizadas en el delta del Guadalfeo para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.

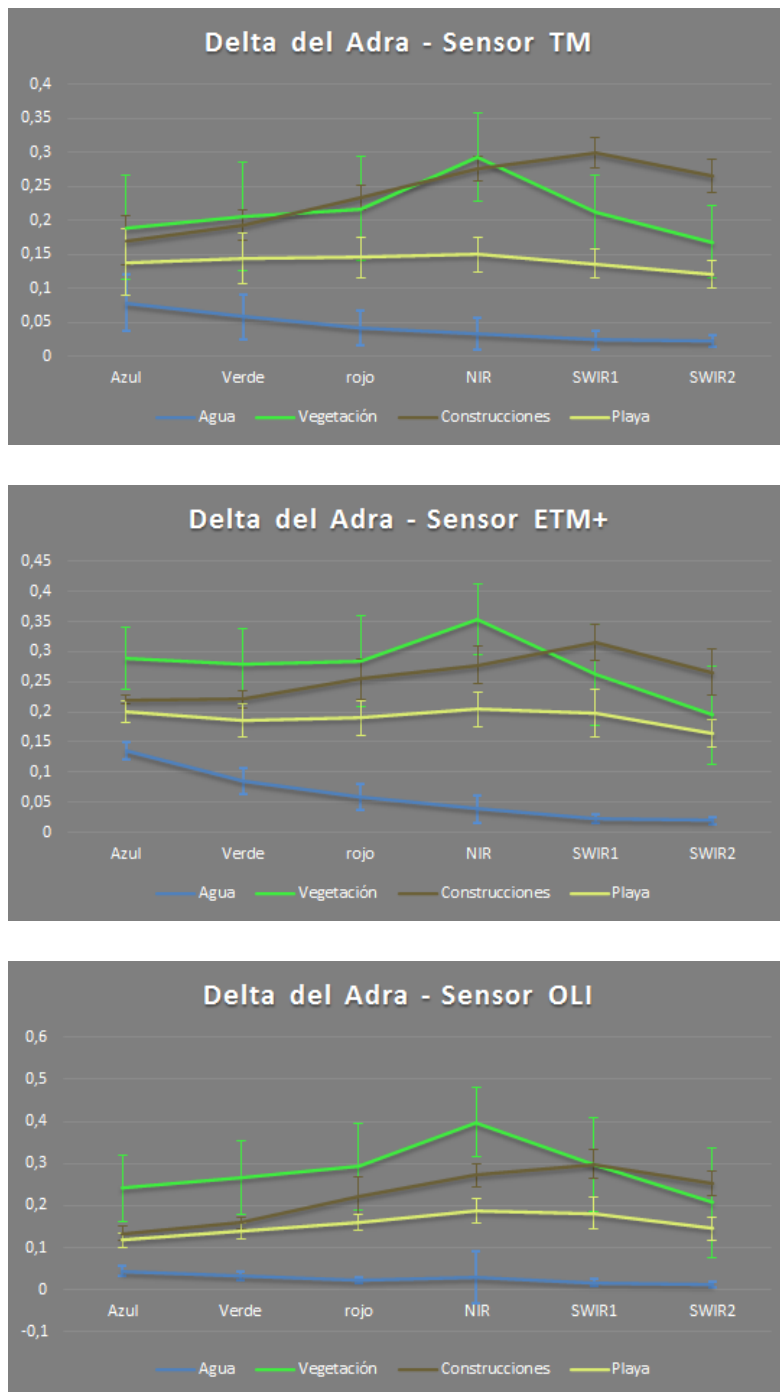


Figura 5.2: Media y desviación estándar de las firmas espectrales de las principales coberturas analizadas en el delta del Adra para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.

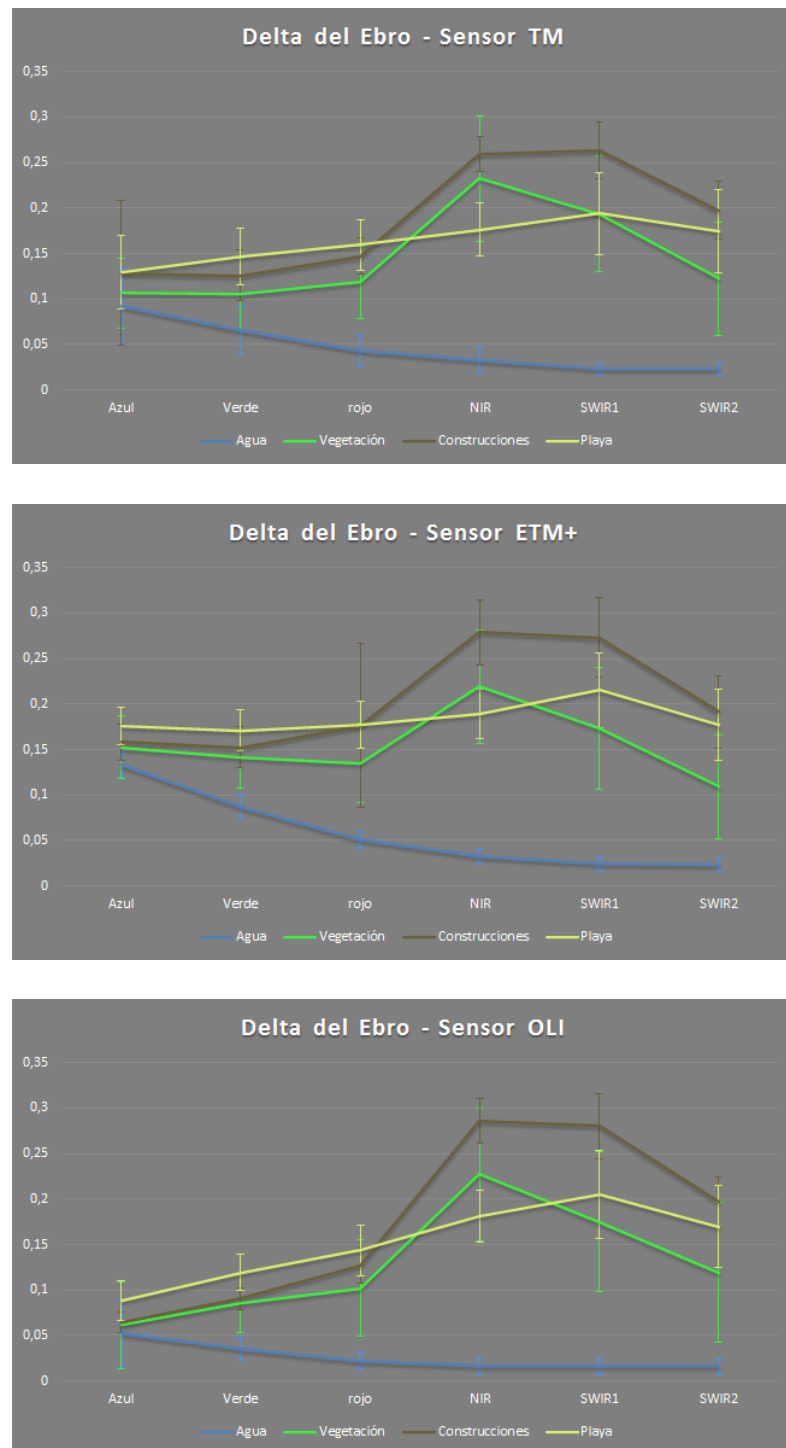


Figura 5.3: Media y desviación estándar de las firmas espectrales de las principales coberturas analizadas en el delta del Ebro para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.

automática (SCP) (Congedo, 2016). Una vez obtenidas las firmas de cada una de las imágenes de la muestra, se sacaron las medias y respectivas desviaciones estándar para su análisis (figuras 5.1, 5.2 y 5.3). Estas firmas permiten comparar el comportamiento de las distintas coberturas de suelo de los datos obtenidos a través de los diferentes sensores para cada banda.

A través de las firmas se aprecia el comportamiento espectral casi opuesto entre las firmas del agua y aquellas pertenecientes al resto de los tipos de suelos analizados, en cuanto que el agua muestra un comportamiento de mayor reflectividad en la banda del azul (seguida de la banda del verde) y disminuye casi a cero en la banda del SWIR2 prácticamente en todos los sensores en las tres zonas de estudio.

El comportamiento espectral de la vegetación va aumentando desde la banda del azul hasta alcanzar su máxima reflectancia en la banda del NIR, y va disminuyendo en las bandas del SWIR1 y SWIR 2, pero no suele bajar menos de 0.1%. Las áreas pertenecientes a zonas urbanas suelen tener los valores más bajos de reflectividad en la zona del VIS, aumentando hasta tener valores máximos en el NIR o SWIR1, y cayendo de nuevo en la banda del SWIR2, aunque no menos de 0.2%. El comportamiento espectral de la vegetación y las zonas urbanas tiene un patrón parecido en las tres zonas y los distintos sensores, aunque las zonas urbanas suelen tener valores de reflectancia un poco mayores.

En el caso del comportamiento espectral de las zonas de playa, en el Guadalfeo y el Adra, la firma espectral es algo más uniforme a lo largo de todas las bandas analizadas en comparación con las otras coberturas. Sin embargo, en el caso del Ebro, sí se aprecian cambios más bruscos, ya que va aumentando hasta la banda del SWIR1 donde suele tener los valores máximos de reflectancia, y vuelve a disminuir en la banda del SWIR2.

las imágenes corregidas atmosféricamente, que será explicado en el capítulo 4. Si bien es cierto que en la banda del azul influye más la dispersión de Rayleigh que la del verde, lo que se quiere verificar es la mayor reflectividad del agua en esta banda que en verde, después de la corrección atmosférica.

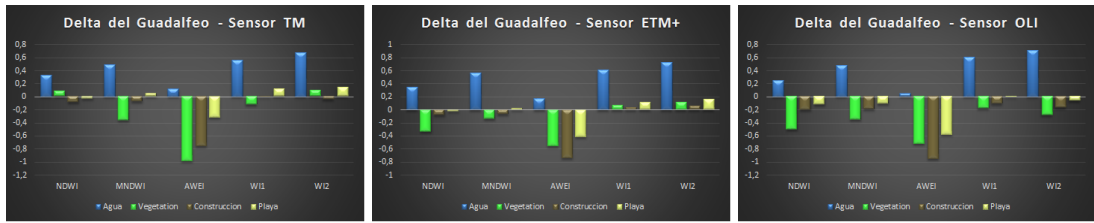


Figura 5.4: Media y desviación estándar de los índices espectrales analizadas en el delta del Guadalfeo para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.

En resumen, los porcentajes de reflectancia del agua en las bandas del azul y verde suelen ser mucho mayor que en la banda del SWIR2, mientras que en la mayoría de los casos, el resto de coberturas se comporta de forma opuesta observándose valores en la banda del azul, menor o casi igual que las que presentan en la banda del SWIR2. Por lo tanto, a partir de estas observaciones y con el fin de explotar el comportamiento espectral en la banda del azul/verde, y potenciar la cualidad de la alta reflectividad del agua en estas bandas en contraste con la casi nula reflectividad en la banda del SWIR2, se proponen dos nuevos índices.

Estos índices se han denominado índice espectral de agua 1 (WI1) e índice espectral de agua 2 (WI2) y están definidos por las ecuaciones Ec. 5.2 y Ec. 5.3 que se muestran a continuación:

$$WI1 = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR2}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$WI2 = \frac{\rho_{Blue} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{Blue} + \rho_{SWIR2}} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

donde ρ_{Blue} , ρ_{Green} y ρ_{SWIR2} representan la reflectancia a nivel de superficie en las bandas del azul, verde e infrarojo de onda corta 2, respectivamente.

Las firmas espectrales de las distintas coberturas diferentes al agua en los tres

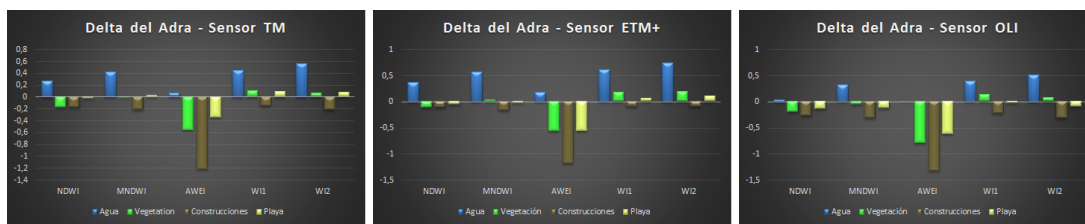


Figura 5.5: Media y desviación estándar de los índices espectrales analizados en el delta del Adra para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.

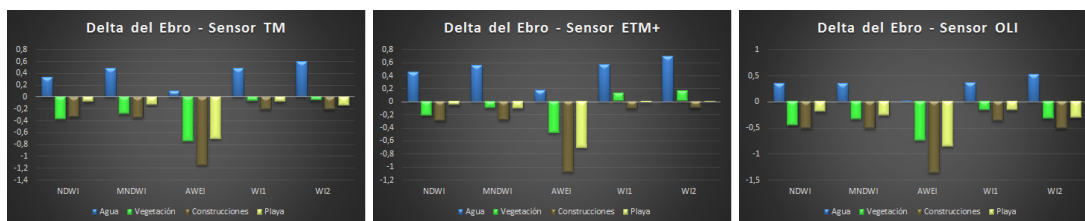


Figura 5.6: Media y desviación estándar de los índices espectrales analizados en el delta del Ebro para los distintos sensores utilizados del proyecto Landsat.

deltas analizados son similares en términos de comportamientos espectral en las bandas azul y SWIR2. De las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se puede observar cambios en el comportamiento espectral de la arena de la playa que parece casi imperceptible. Usualmente, NDWI y MNDWI están basados en la presunción de que el comportamiento espectral de cubiertas distintas a las de agua es similar al comportamiento en la banda del verde, y opuesto en el NIR y SWIR2. Aunque generalmente utilizan valores de índice negativos para píxeles que no se clasifican como agua y positivos para píxeles que sí, esto no siempre se cumple.

En algunos estudios se ha comprobado que NDWI toma valores positivos para zonas de construcciones al igual que el agua (Ji et al., 2009). O como puede ser el caso de la playa, teniendo en cuenta las imágenes de la muestra seleccionadas para analizar las firmas espectrales. Esto puede dar como resultado una mala clasificación de los píxeles de alguna de las cobertura presentes en la imagen como si fuesen agua; con lo que la precisión de la detección de la LC disminuiría. Es aquí dónde juega un papel importante tener claro los posibles valores que toman los índices calculados de acuerdo a las coberturas analizada y escoger el umbral óptimo para realizar una adecuada clasificación.

En las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se observa la media de los índices espectrales calculados para las imágenes de la muestra analizada. En estas figuras se puede observar como los valores más altos para el agua de los índices analizados, es el propuesto (WI2), calculado con la banda del azul. Es el valor de índice más alejado de los valores de índices del resto de coberturas en cada caso (zona/sensor). Por lo tanto, esta gran diferencia entre valores ayudarían a un mejor desempeño en el algoritmo de Otsu durante el proceso de segmentación, ya que este método maximiza la varianza entre clases y minimiza la varianza dentro de las misma clase (Vala and Baxi, 2013).

Metodología Para la Detección de la Línea de Costa

*La verdadera ciencia enseña,
por encima de todo,
a dudar y a ser ignorante.*

Miguel de Unamuno.

RESUMEN: En este capítulo se describen los pasos y procesos utilizados, tanto con el software de distribución libre QGIS para el pre-procesamiento, como en el algoritmo planteado para el procesamiento de las imágenes logrando optimizar el uso de los índices espectrales propuestos.

6.1 | Introducción

En esta investigación se utilizaron imágenes Landsat que fueron descargadas a través del portal en línea de acceso gratuito, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), llamado EarthExplorer. A través de esta plataforma, indicando las coordenadas de la zona y las fechas de interés, se pueden consultar, visualizar y descargar las imágenes satelitales de distintos sensores, así como imágenes aéreas de vuelos específicos que están disponibles

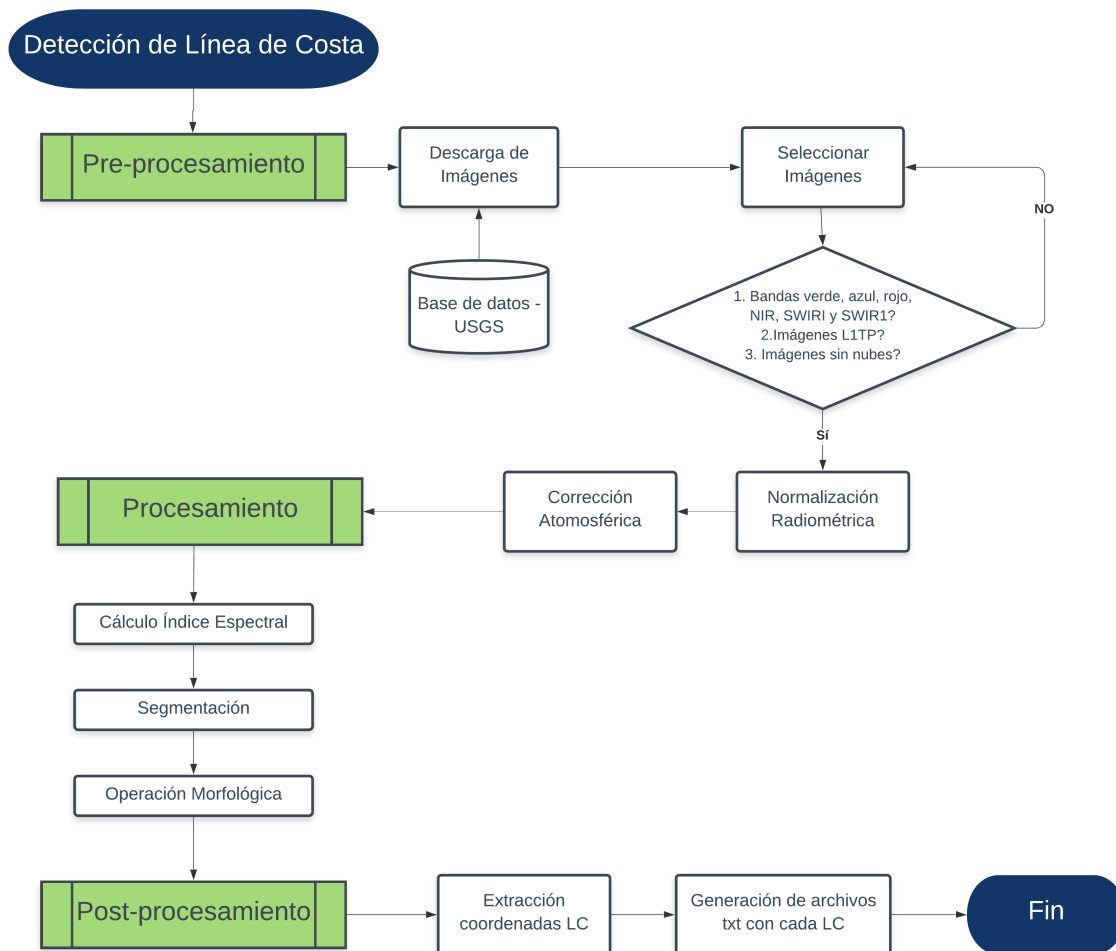


Figura 6.1: Distribución de las imágenes seleccionadas por fecha y sensor para cada zona de estudio.

en la base de datos que proporciona esta plataforma. Para esta investigación se dieron las coordenadas correspondientes a las zonas del delta del Guadalfeo, Adra y Ebro para las fechas comprendidas entre 1984 y 2017, como se ha descrito en el Capítulo IV. Para extraer la línea de costa (LC) de las imágenes Landsat seleccionadas, se realizaron una serie de pasos que serán descritos en las siguientes secciones. Estos pasos se pueden agrupar en tres fases principales: Pre-procesamiento, Procesamiento y Post-Procesamiento. En la figura 6.1 se puede observar los procesos involucrados en cada fase.

6.2 | Pre-procesamiento

Antes de poder obtener la información física deseada de las imágenes satelitales, es necesario realizar una serie de pasos previos. Estos pasos incluyen las correcciones a las imágenes¹, con el fin de estandarizar los datos captados por los sensores de medición (Hantson et al., 2011; Minu and Amba, 2015), siendo esta fase lo que comúnmente se denomina pre-procesamiento (Vani, 2017).

En esta investigación no se realizó ningún tipo de corrección geométrica, ya que los datos Landsat seleccionados son del tipo LTP1, como se explicó en el Capítulo IV. Por lo tanto, los datos utilizados son los de más alta calidad de pre-procesamiento suministrados por USGS hasta el momento. El georregistro de las imágenes seleccionadas es consistente y está dentro de las tolerancias aceptables de corrección (imagen a imagen), con errores $\leq 10\text{m}$ (raíz del error cuadrático medio - RMSE) (USGS National Land Imaging Program, 2017).

En este caso, tampoco se realizó ninguna corrección topográfica, porque ésta es realizada en zonas con terrenos escarpados, ya que en dichos casos las condiciones de iluminación varían con los cambios del ángulo cenital a lo largo del año (Hantson and Chuvieco, 2011; Pimentel et al., 2014).

Sin embargo, sí fueron necesarios otros pasos enmarcados dentro del pre-procesamiento, entre ellos, la conversión de unidades digitales a valores de radiancia (normalización radiométrica) y posteriormente a valores de reflectancia en la superficie (corrección atmosférica). Estos pasos se hicieron utilizando el sistema de información geográfica de acceso libre Quantum GIS, a través del *plug-in* de clasificación semi-automático (SCP) (Congedo, 2016).

En una imagen satelital, cada pixel graba la intensidad de la radiancia para una longitud de onda dada, lo que equivale al brillo del objeto observado (NASA, 2004). Este brillo está representado por un "número digital" (DN) que puede ser escalado a valores calibrados de radiancia absoluta o a valores de reflectancia.

¹Geométrica, topográfica, radiométrica y atmosférica.

De acuerdo al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2019), los valores de radiancia captados por el sensor se pueden obtener utilizando la expresión Ec. 6.1. Los factores de reajuste que aparecen en ella, se extraen del archivo de metadatos que se descarga con cada imagen Landsat.

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (\text{Ec. 6.1})$$

donde,

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor [$W/(m^2sr\mu m)$]

Q_{CAL} = Valor del pixel cuantizado / calibrado [DN]

M_L = Factor multiplicativo de reajuste específico para cada banda [$W/(m^2sr\mu m)$]

A_L = Factor aditivo de reajuste específico para cada banda [$W/(m^2sr\mu m)$]

Con el fin de obtener las reflectancias espectrales a nivel de superficie, se realizó también una corrección atmosférica. Esto es debido a que la energía electromagnética pasa a través de la atmósfera antes de tocar la superficie, por lo tanto, el brillo grabado por el sensor no es solamente el debido a la reflectancia de la superficie de la tierra, sino también a la dispersión y absorción de la energía incidente por parte de las partículas presentes en la atmósfera, siendo el grado de interferencia dependiente de la longitudes de onda (Chavez, 1988; De Keukelaere et al., 2018; Zhang et al., 2010).

En el caso particular de la dispersión de Rayleigh, por ejemplo, es un proceso dominante en la alta atmósfera y afecta en mayor proporción a la energía en las longitudes de onda más cortas (Emery and Camps, 2017). Dado que en los índices propuestos se utilizan la banda del azul y del verde, se hace necesaria esta corrección. Por otra parte, es recomendable trabajar con reflectancias en la superficie para estandarizar los datos al utilizar múltiples imágenes, adquiridas con diferentes sensores (Vicente-Serrano et al., 2008; Vuolo et al., 2015).

Se han desarrollado distintos modelos para tratar de corregir o minimizar el ruido introducido en las señales recibidas por los sensores de medición debido

a la influencia atmosféricas (Gilmore and Saleem, 2015). Estos modelos suelen estar agrupados en dos grupos principales: los métodos físicos y los basados en imágenes. Los primeros requieren mediciones in situ que no siempre están disponibles en las fechas de captura de las imágenes, y los segundos se basan en información extraída estrictamente de las imágenes (Chavez, 1996; Moran et al., 1992; Nazeer et al., 2014; Song et al., 2001).

En esta investigación, la reflectancia en la superficie se obtuvo aplicando el método de sustracción de objetos oscuros (DOS) propuesto por Chavez (1988) por su sencillez y efectividad. Este método es un modelo de corrección basado en imágenes, y se centra en la hipótesis de que dentro de las imágenes algunos píxeles se comportan como objetos negros y sus radiancias son debido a la dispersión atmosférica, por lo que estima la contribución atmosférica a partir de superficies muy oscuras con reflectancias cercanas a cero (Chuvieco, 2016).

Algunos estudios han comparado el método DOS con otros métodos de corrección atmosférica para superficies de agua y ambientes urbanos costeros, mostrando que el método DOS es uno de los que tiene mejor desempeño, siendo uno de los más utilizados en estudios costeros (Nazeer et al., 2014; Pacheco et al., 2015; Rasuly et al., 2010; Rokni et al., 2014) y al utilizar índices espectrales para detectar cuerpos de agua (Gilmore and Saleem, 2015).

La reflectancia a nivel de superficie se calculó basándose en el método de Sustracción de Objeto Oscuro (DOS) según la expresión Ec. 6.2 (Chavez, 1996; Congedo, 2016) a través del sistema de información geográfica QGIS. Los parámetros utilizados para la conversión de radiancia a reflectancia han sido obtenidos de los archivos de metadatos descargados con cada una de las imágenes.

$$\rho_{g\lambda} = [\pi * (L_{\lambda} - L_p) * d^2] / (E_{sun\lambda} * \cos \theta) \quad (\text{Ec. 6.2})$$

donde,

$\rho_{g\lambda}$ = reflectancia espectral en la superficie

L_{λ} = radiancia espectral en el sensor del satélite [$Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$]

L_p = el efecto bruma.

d = Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas

θ = ángulo zenital solar en grados

$E_{sun\lambda}$ = Irradiancia media solar exo-atmosférica [$Wm^{-2}\mu m^{-1}$]

λ = banda espectral

Una vez se han transformado los DN de cada pixel de las imágenes seleccionada a valores de la reflectancia en la superficie, se procedió a recortar el área de interés de cada imagen según la zona de estudio. Para esto se desarrolló un algoritmo en matlab que permite escoger un grupo de imágenes georeferenciadas (2 ó más), un vez todas las imágenes que se quieren analizar han sido seleccionadas, el algoritmo guarda la información de dichas imágenes y pide al usuario seleccionar en la primera imagen el área de la zona de interés. El algoritmo guarda las coordenadas seleccionadas en la pantalla y aplica el recorte al resto de imágenes con las mismas coordenadas. El algoritmo se encuentra en el anexo A.

6.3 | Procesamiento

La siguiente fase consiste en el procesamiento de las imágenes. Es aquí donde se calcula el índice espectral con el que se desea trabajar, seguido de una segmentación de las imágenes por el método de umbralización y la aplicación de una operación morfológica. Estos son los procesos necesarios para discriminar los píxeles correspondiente a la LC.

Como se ha mencionado en la introducción, en los últimos años se han venido desarrollando técnicas de percepción remota para la detección de la LC a través de imágenes multiespectrales dado su mejoramiento en las resoluciones espaciales, temporales y radiométricas, así como la facilidad de acceso libre a imágenes de mediana resolución. Entre las técnicas de detección automática de LC a partir de imágenes de satélite más utilizadas están las técnicas de detección de bordes y las de clasificación (Gens, 2010).

Las técnicas de clasificación buscan separar la imagen entre tierra y agua. Así, la línea que separa la frontera de ambos es la LC (Zhang et al., 2013). Las distintas técnicas de clasificación desarrolladas están divididas principalmente en dos grupos: las supervisadas y no supervisadas (Zhang and Wang, 2010; Zhu, 2001). La clasificación supervisada depende en gran medida del analista para identificar las zonas que representan cada clase según el esquema de clasificación seleccionado; mientras que la no supervisada requiere mínimo conocimiento del analista para el proceso de clasificación. En su lugar, casi todo el trabajo es realizado por procesos computarizados reiterativos que asignan píxeles a un determinado grupo, que son espectralmente similares a lo largo de las bandas de la imagen. Después de dicho proceso, el analista decide a qué clase pertenece cada grupo según el esquema de clasificación seleccionado (Khorram et al., 2016).

La segmentación por umbralización utilizada en esta investigación es una técnica de procesamiento de imágenes enmarcada en la clasificación no supervisada, que se basa en objetos que están constituidos por píxeles que comparten igual o similar información, como son las características espectrales, de textura, de información espacial, etc. (Anjna and Rajandeeep, 2016; Maras et al., 2016).

El procesamiento de las imágenes para obtener la LC fue realizado a través de la creación e implementación de un algoritmo en Matlab®, que permite aplicar de forma automática una serie de técnicas de procesamiento de imágenes a un grupo de imágenes seleccionadas y de esta forma extraer la LC de muchas imágenes con un solo click. El algoritmo inicialmente pide seleccionar las imágenes a analizar y luego calcula el índice espectral (con el que se esté trabajando) conforme a lo expuesto en el Capítulo V.

Una vez obtenidos los índices, se realiza el proceso de segmentación. Este produce una imagen binaria por medio de la técnica de umbralización. Para esto se ha usado el método de Otsu Otsu (1979), un método de umbralización global, ampliamente usado por su simpleza y efectividad (Qu and Zhang, 2010). Éste asume que la imagen tiene dos clases de píxeles que caen en alguna de las

dos categorías, el objeto buscado y el fondo. Así, realiza iteraciones sucesivas automáticas, hasta que encuentra un umbral óptimo que separa ambas clases, de tal manera que la dispersión de los elementos dentro de la misma clase sea la mínima posible, y la dispersión entre ambas clases sea la mayor posible (Otsu, 1979).

Posterior al proceso de segmentación se aplica una operación morfológica, que permite llenar los vacíos en el interior de la zona clasificada como tierra.

6.4 | Post-procesamiento

Con los procesos realizados previamente, se tiene ya divididas las imágenes en píxeles correspondientes al agua y aquellos que no. El siguiente paso es extraer las coordenadas del límite que separa dichos píxeles. En el anexo ?? se muestra el algoritmo realizado para el procesamiento de las imágenes. En la figura 6.2 se muestra un ejemplo de aplicación de cada paso anteriormente descrito en una de las imágenes seleccionadas.

6.5 | Validación de los Datos

La metodología de procesamiento se aplicó utilizando distintos índices además de los propuestos de forma que pudieran ser comparados y así comprobar y medir su efectividad para detectar la LC. Las métricas estadísticas usadas para analizar la efectividad de la metodología fueron la media y la desviación estándar de las distancias verticales entre la LC extraída de las imágenes Landsat y la de los datos de alta resolución.

$$Mean = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_{j_{Hr}} - Y_{j_{LS}})}{n} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

$$D_j = (Y_{j_{Hr}} - Y_{j_{LS}}) \quad (\text{Ec. 6.4})$$

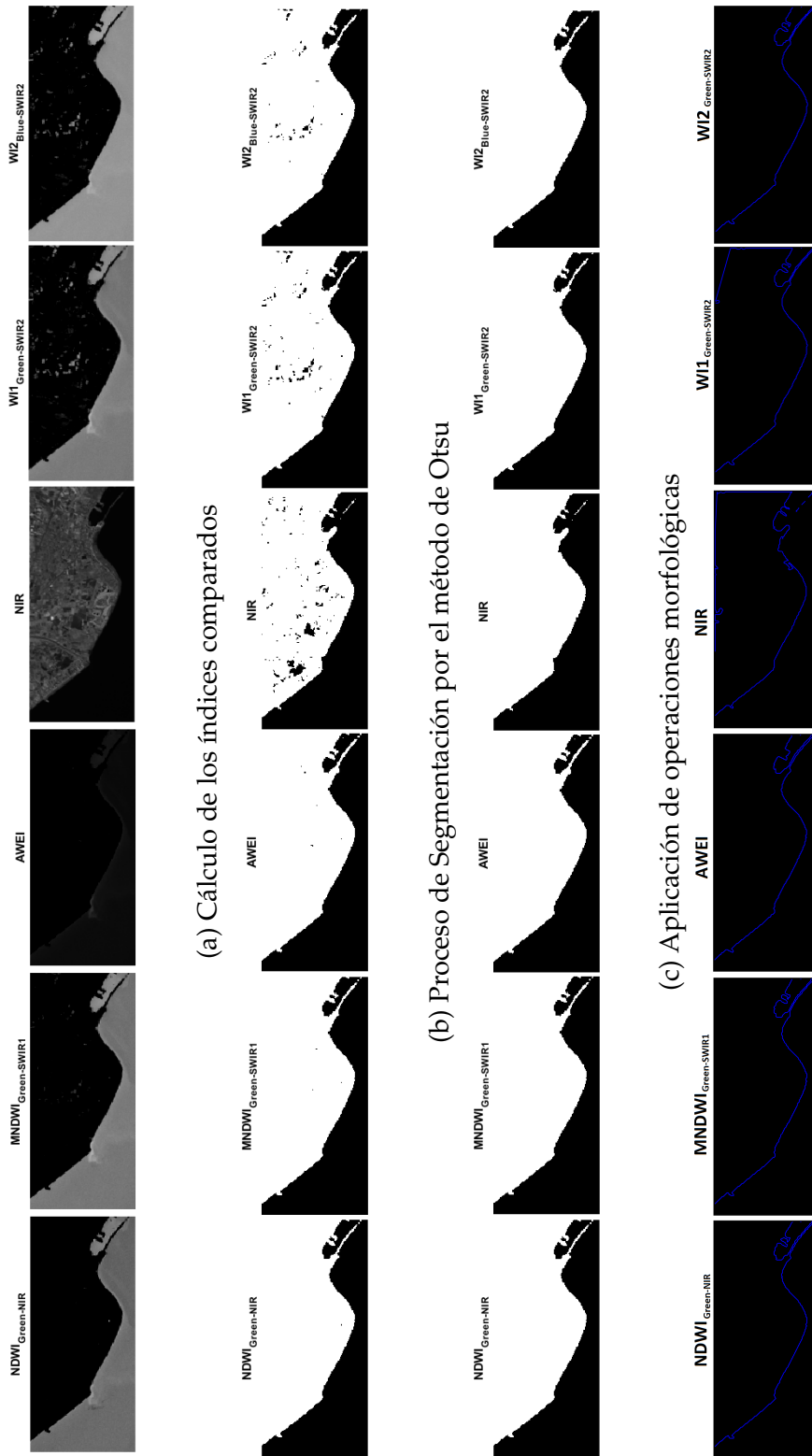


Figura 6.2: Secuencia del procesamiento de las imágenes para obtener la línea de costa. Ejemplo aplicado a la imagen obtenida el 18 de noviembre de 2014.

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Dj - Mean)^2}{n}} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

siendo,

Dj = La distancia en metros entre los datos de alta resolución y los datos derivados de las imágenes Landsat. Se calculó la distancia vertical entre las líneas de costa comparadas para las mismas coordenadas x. Dj es un valor positivo cuando la LC de las imágenes Landsat está hacia el mar, y negativo en caso de que la LC extraídas de las imágenes Landsat estén hacia la playa.

Yj_{LS} = Coordenadas de la LC extraída de las imágenes Landsat.

Yj_{Hr} = Coordenadas de la LC extraída de los datos de alta resolución.

$Mean$ = La media de Dj en metros.

STD = La desviación estándar de Dj en metros.

n = El número de elementos evaluados.

6.6 | Indicador de Línea de costa

La LC está idealmente definida como la interfaz entre la tierra y el agua (Dolan et al., 1980). Aunque esto pueda parecer fácil y simple de identificar, es un desafío, ya que la línea está continuamente cambiando en función de factores como las mareas astronómicas, el transporte de sedimentos, el oleaje, las corrientes e incluso las intervenciones humanas, entre otros factores. Las líneas de costa analizadas en este trabajo son instantáneas, representan una posición específica de acuerdo a las fechas y hora en que fue tomada la imagen.

Durante las últimas décadas, se han definido distintos tipos de indicadores de LC, principalmente dependiendo de la fuente de donde se obtuvieron los datos. Boak and Turner (2005) clasificaron 45 indicadores de LC encontradas en la literatura. En nuestro estudio, el indicador de LC seleccionado es la línea que divide los píxeles secos de los húmedos, o la comúnmente llamada línea seca/húmeda.

Resultados y Discusión

*Si buscas resultados diferentes,
no hagas siempre lo mismo!*

Albert Einstein.

RESUMEN: En este capítulo se muestran los resultados obtenidos tras aplicar la metodología desarrollada utilizando los diferentes índices evaluados y propuestos. Así, también se ha analizado la bondad del comportamiento de los índices mediante la comparación con datos de alta resolución.

La metodología de procesamiento desarrollada ha sido aplicada a las tres zonas de estudio (delta del Guadalfeo, del Adra y del Ebro). Esta metodología fue evaluada utilizando diferentes índices espectrales (NDWI, MNDWI, AWEI) y la banda del infrarrojo cercano, usados en diferentes estudios para obtener la LC a partir de imágenes satelitales. Todo ello con el fin de ser comparados con las líneas de costa obtenidas al utilizar los índices espectrales propuestos (WI1 y W2).

Se realizó una comparativa de la efectividad para detectar la LC en las tres zonas de estudio seleccionadas por cada uno de los índices evaluados, mediante una revisión visual de todas las imágenes en cada zona de estudio, al finalizar el

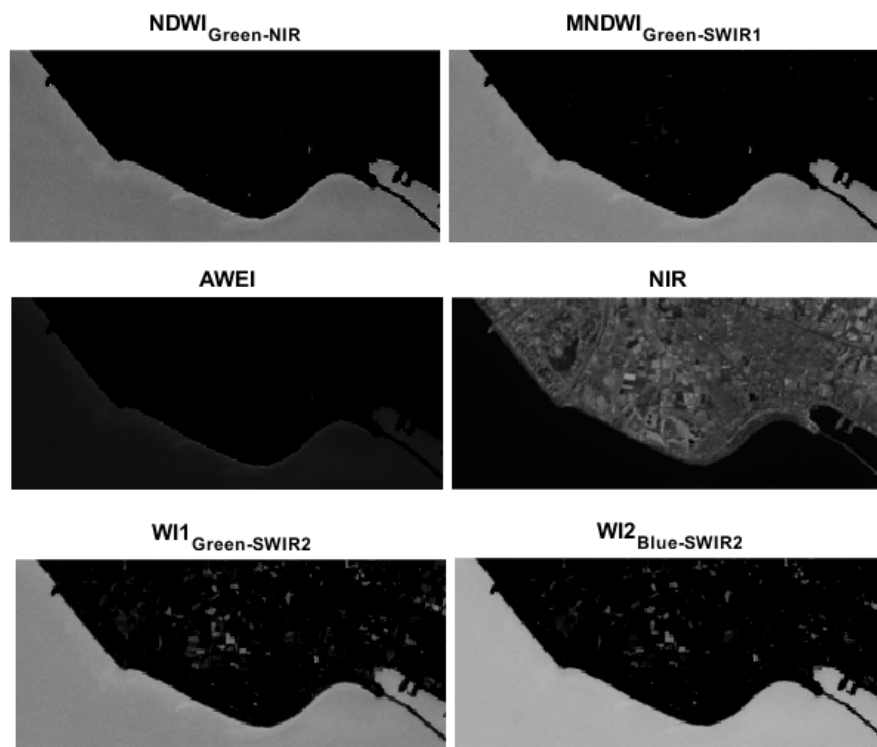
procesamiento de las mismas. Se verificó cuáles de las imágenes había detectado la línea de costa de forma exitosa, cuáles no la había detectado o la detectó de forma incompleta o tuvo demasiado ruido alrededor de la LC de forma que no fuese útil para ser analizada. Esto es mostrado en las tablas 7.1, 7.2 y 7.3 para el delta del Guadalfeo, Adra y Ebro, respectivamente.

También se realizó un análisis a nivel sub-píxel aplicando una interpolación bicúbica a las imágenes, y posteriormente la metodología propuesta. Finalmente se realizó una validación estadística (tanto a nivel píxel como subpíxel) en donde se calculó el sesgo de los resultados mediante la media y desviación estándar de las distancias verticales entre las líneas de costa obtenidas con la metodología aplicada a las imágenes Landsat y las obtenidas a partir de datos de alta resolución (DGPS y ortophotos).

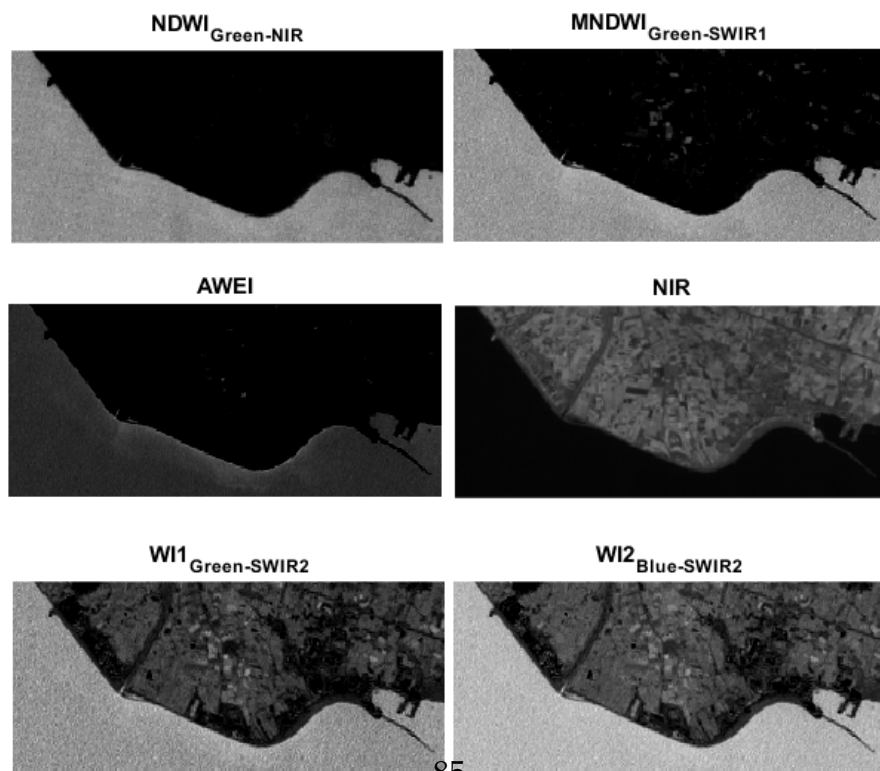
7.1 | Delta del Guadalfeo

En primer lugar, se observó a partir de una comparación visual que la metodología propuesta utilizando los índices espectrales WI1 y WI2 fue capaz de separar los píxeles correspondientes al agua de aquellos que corresponden a otros tipos de suelo de manera satisfactoria. La figura 7.1 muestra las imágenes después de calcular cada uno de los índices evaluados para una fecha dada y para los distintos sensores utilizados. En esta figura se puede observar claramente la división tierra-agua, aunque en los sensores TM y ETM+, los índices WI1 y WI2 resultaron ser más sensibles que el resto para detectar las zonas de vegetación.

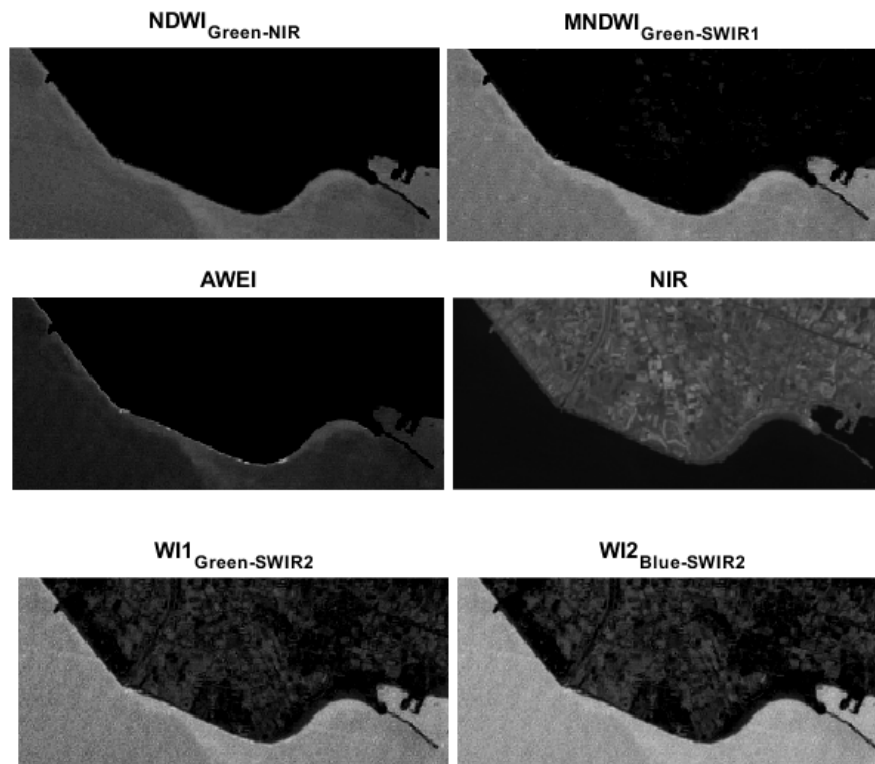
Por otra parte, en las imágenes provenientes del sensor OLI (figura 7.1a), con los índices WI1 y WI2 no se observa la detección de zonas de vegetación pero sí se ve algún ruido en el área correspondiente a la tierra. Este ruido es debido a los plásticos de los invernaderos, ya que la mejor combinación de bandas para su detección comprenden las bandas del verde, el azul y el infrarrojo cercano (Aguilar et al., 2019). Para visualizar mejor esto se muestra la figura 7.3, donde se ve que el ruido identificado en la imagen Landsat (sensor OLI) coincide con algunos invernaderos detectados en la imagen de alta resolución.



(a) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor OLI el 8 de enero de 2016.



(b) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor ETM+ el 5 de febrero de 2000.

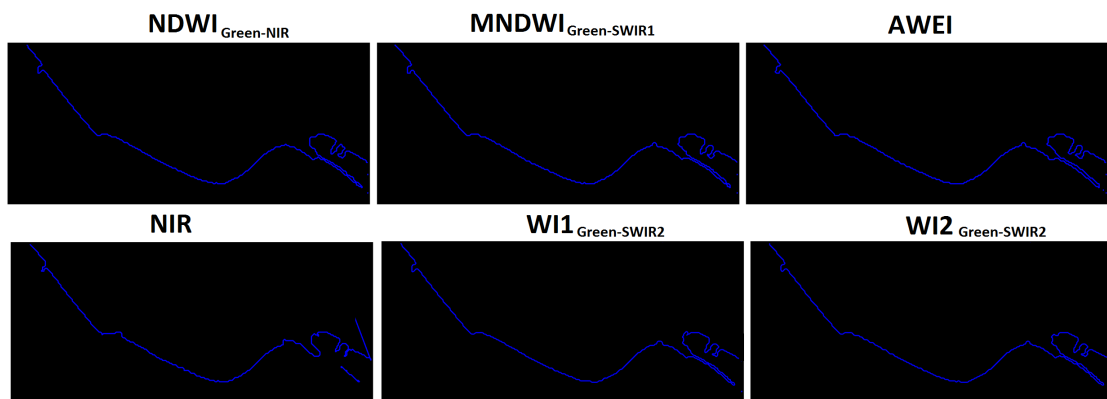


(c) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor TM el 15 de Julio de 2003.

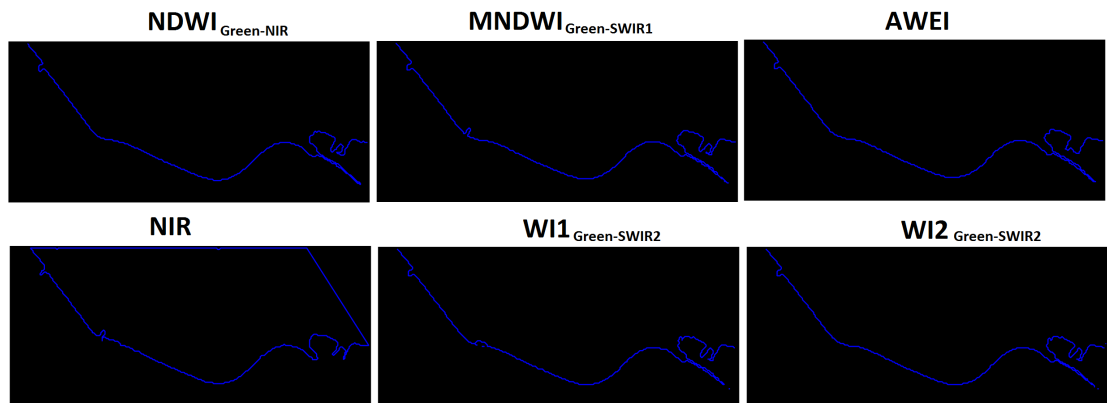
Figura 7.1: Índices calculados en imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Guadalfeo.

Los ruidos presentes en los píxeles clasificados como tierra (zona de vegetación / invernaderos) de las imágenes en donde se utilizaron los índices WI1 y WI2 fueron eliminados en el paso de aplicación de operaciones morfológicas. Esto puede ser claramente observado en las figuras 7.1 y 7.2, lo cual confirma que la metodología extrae de manera satisfactoria la LC.

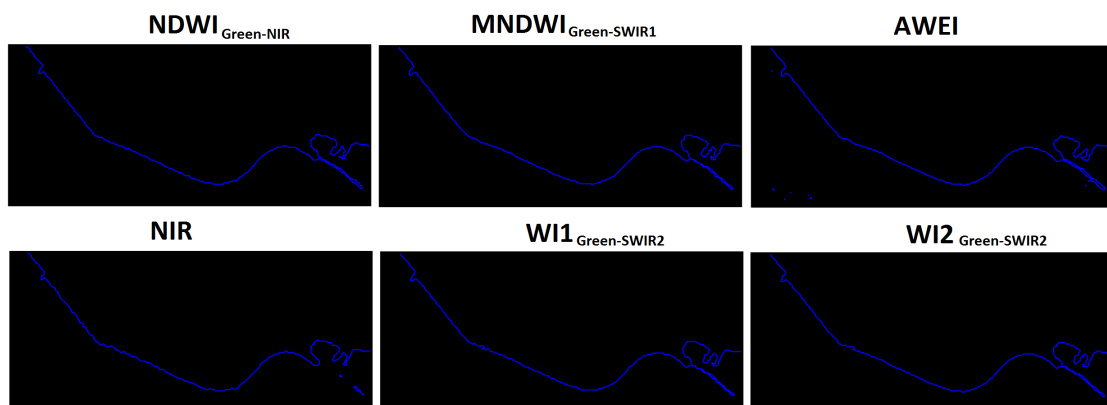
Aparentemente, con una inspección visual, todos los índices evaluados, incluyendo los propuestos, muestran una detección similar de la LC. En algunas imágenes se ve una ligera diferencia en la zona de la desembocadura, donde en algunas casos, la LC es dibujada dentro de la misma. Puede ser debido a la pres-



(a) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor OLI el 8 de enero de 2016.



(b) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor ETM+ el 5 de febrero de 2000.



(c) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor TM el 15 de Julio de 2003.

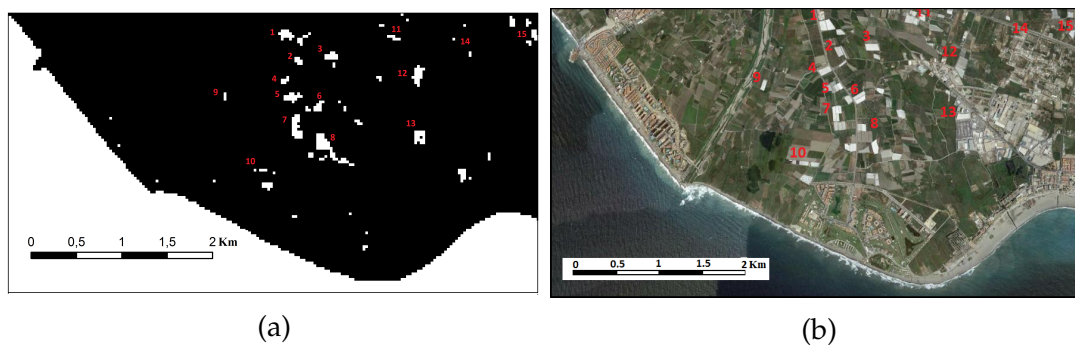


Figura 7.3: Comparativa de localización de invernaderos en la llanura del delta del Guadalfeo. La figura (a) muestra los invernaderos detectados con el índice WI2 en una imagen capturada por el sensor OLI el 12 de Septiembre de 2013, que coinciden con los encontrados en la figure (b) de una imagen de Google del 31 de Diciembre de 2013. Imagen reproducida con autorización de Viaña-Borja, S.P y Ortega-Sánchez, M., *Remote Sensing MDPI Journal*, 2019

encia de humedad en dicha zona, siendo más sensible de detectar por algunos índices, como es el caso de la banda del NIR y el índice MNDWI.

Como resultado en el delta del Guadalfeo de la comparativa de efectividad realizada, se observó que al utilizar el índice propuesto WI2, se detectó la LC completa y sin ruidos alrededor de un 99.6% del total de las imágenes analizadas, es decir que se pudo obtener la LC en casi todas las imágenes; en cambio, con el resto de índices no fue tan efectivo.

En el caso del índice AWEI, no fue capaz de detectar la LC en casi un 44% de las imágenes, y en alrededor del 20% de las imágenes detectó demasiado ruido, lo cual hacía que no fueran útiles los resultados. En el caso de MNDWI, no fue capaz de detectar la LC en un 11% y detectó mucho ruido en casi un 12% de las imágenes; mientras que NDWI fracasó en un 5% y detectó la LC con ruido en alrededor del 13% de las imágenes. La banda del NIR fue capaz de detectar la LC sin ruidos o errores solo en un 32% de las imágenes. El otro índice propuesto (WI1) detectó la LC en un 86% de las imágenes, siendo el segundo índice más efectivo en detectar la LC del total de imágenes seleccionadas en esta zona.

La figura 7.4 muestra algunos ejemplos de imágenes en donde no fue de-

tectada o había demasiado ruido alrededor de la LC, siendo de poca utilidad los resultados obtenidos en dichos casos. Estas situaciones se presentaron en casi todos los índices evaluados, excepto las líneas de costa detectadas con el índice WI2, el cual detectó de manera satisfactoria la LC en prácticamente todas las imágenes. La tabla 7.1 resume el número de imágenes que detectaron adecuadamente las líneas de costa, sin ruidos apreciables, de acuerdo al tipo de sensor y el índice evaluado.

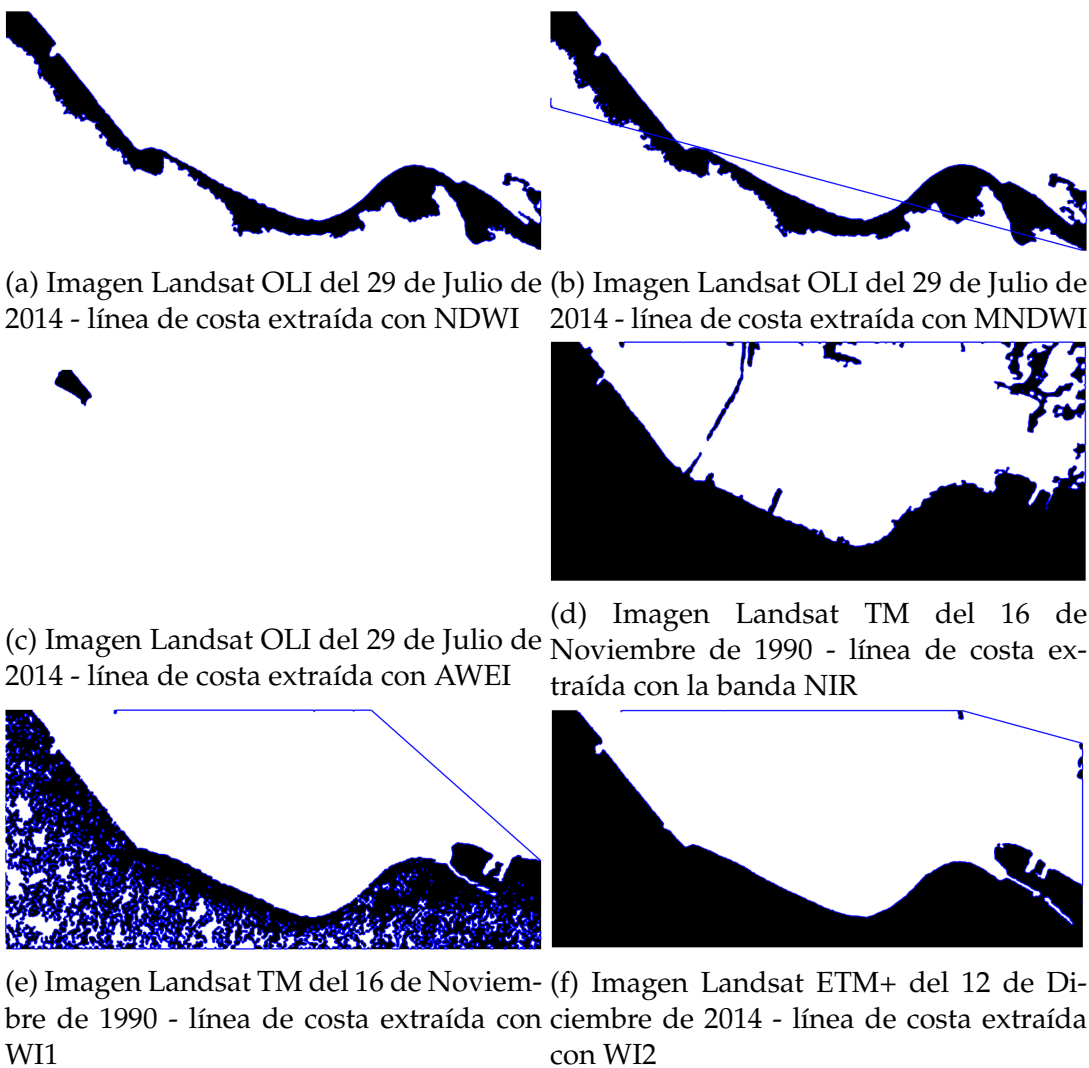


Figura 7.4: Ejemplo de algunos errores detectados después de aplicar la metodología a las imágenes seleccionadas en el delta del río Guadalfeo.

Tabla 7.1: Número de imágenes en donde se detectó correctamente la línea de costa, sin ruidos apreciables después de aplicar la metodología propuesta con los diferentes índices evaluados en el delta del río Guadalfeo.

Sensor	Imágenes	NDWI	MNDWI	AWEI	NIR	WI1	WI2
TM	51	30	31	24	24	25	50
ETM+	149	146	145	113	47	149	149
OLI	64	41	28	24	14	50	64

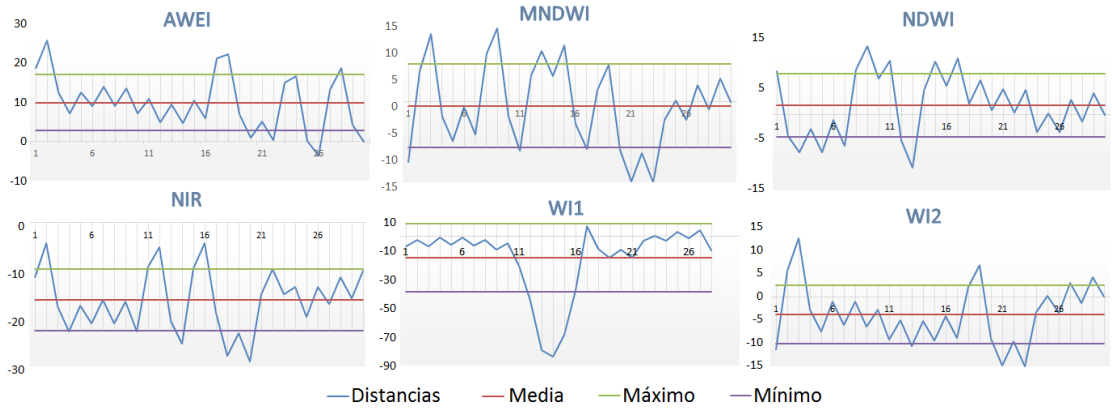
7.1.1 | Análisis de la precisión

En el apéndice B se muestra la tabla B.1 con los resultados del análisis estadístico (media y desviación estándar), tanto a nivel pixel (resolución espacial original) como a nivel sub-pixel (resolución espacial de las imágenes interpoladas bajo diferentes factores). En la figura 7.5 se muestran las variaciones verticales de las coordenadas de la LC detectadas en las imágenes Landsat con respecto a la LC extraída de los datos de alta resolución.

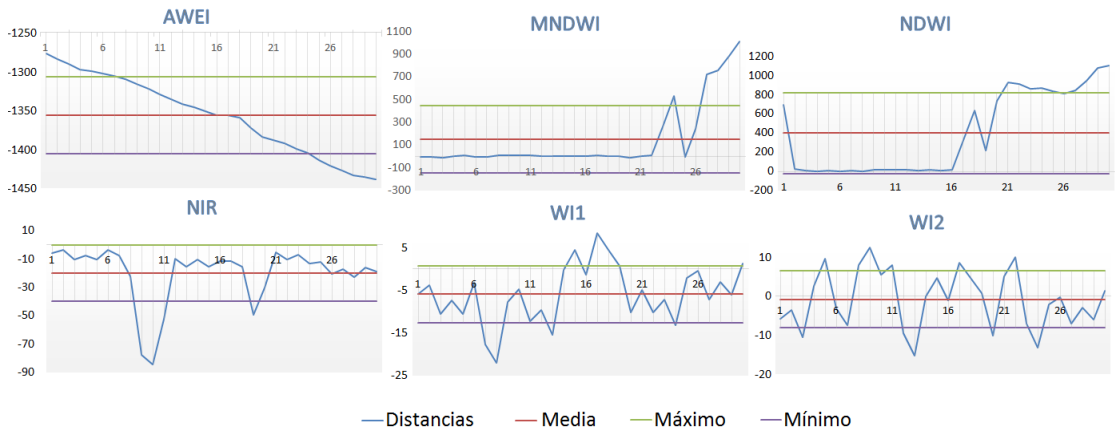
A nivel pixel, se observó (tabla B.1) que AWEI obtuvo la precisión más deficiente. Esto es debido a que en la mayoría de los casos este índice no fue capaz de detectar completamente la LC (como sucedió en la imagen del 23 de mayo de 2013) o había mucho ruido alrededor de la misma, ocasionando errores en los resultados (por ejemplo la LC detectada en 6 de febrero de 2015).

En el caso del NDWI y MNDWI, aunque en algunas de las imágenes se obtuvieron los valores en los errores más bajos, en otros casos no obtuvieron una LC útil (como se puede observar en los resultados de la imagen OLI de Mayo de 2013) o la precisión era mayor a la resolución del pixel (imágenes Diciembre 2014 y febrero de 2015).

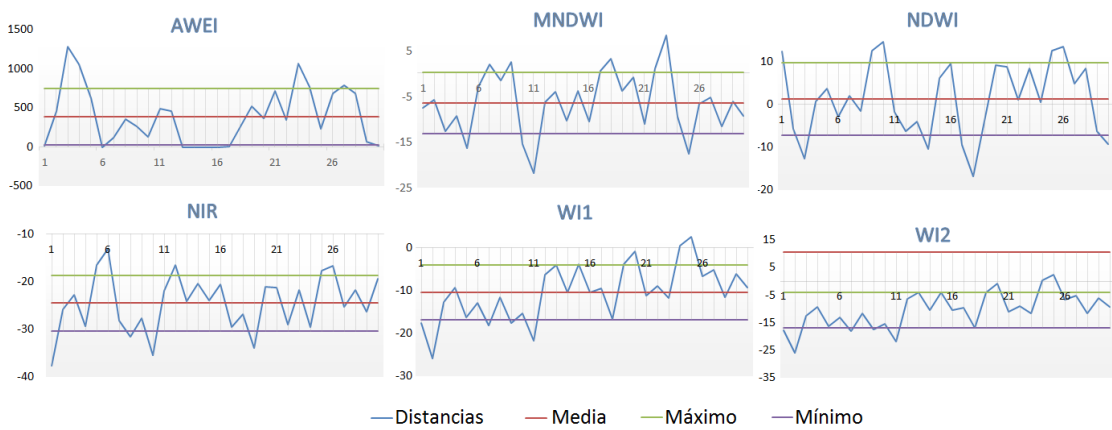
De acuerdo a los resultados, la banda del NIR y los índices WI1 y WI2 fueron los únicos que lograron obtener la LC sin ruidos que ocasionaran grandes errores. En el caso de la banda del NIR, aunque en las 5 imágenes evaluadas para analizar la precisión se pudo obtener la LC, los valores de los errores fueron mayores en comparación con los de los índices WI1 y WI2. Finalmente, los va-



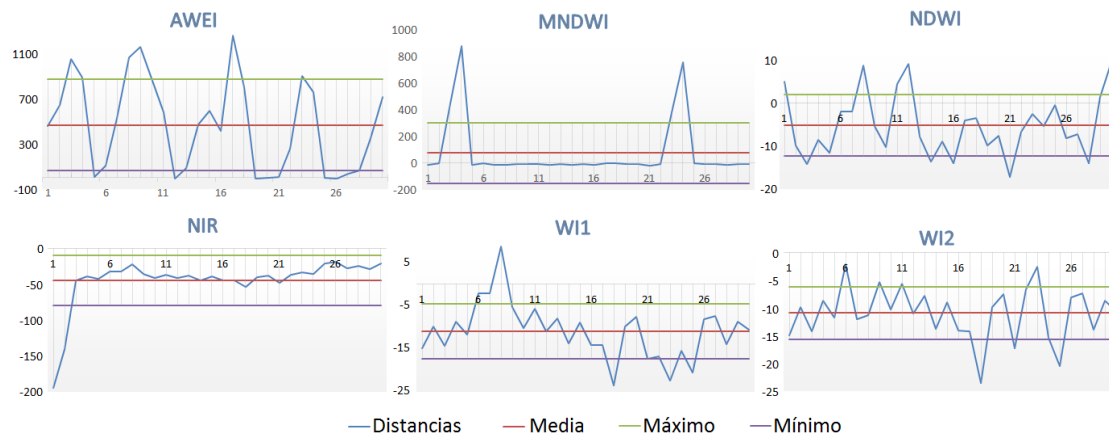
(a) 18 Julio 2010



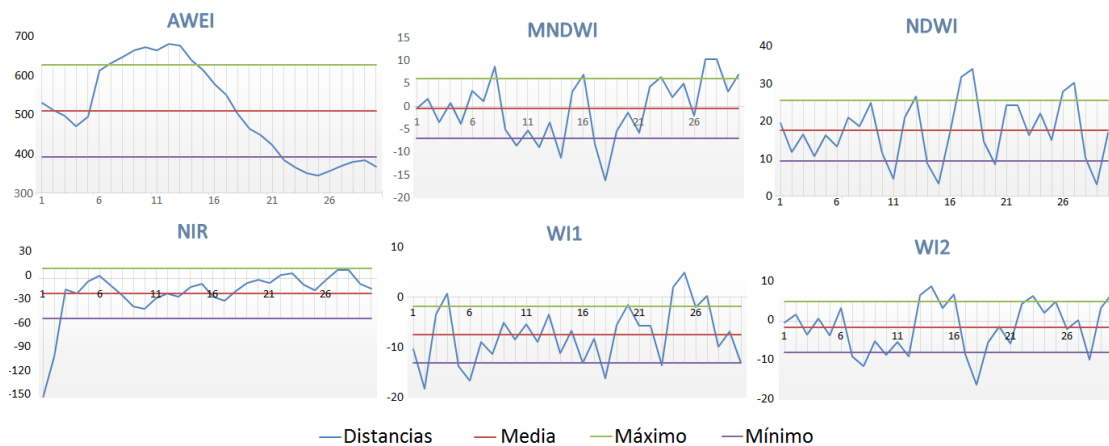
(b) 23 Mayo 2013



(c) 25 Octubre 2014



(d) 12 Diciembre 2014



(e) 6 Febrero 2015

Figura 7.5: Gráficas de las distancias verticales con sus respectivos valores medios y desviación estándar, entre la línea de costa a partir de las imágenes Landsat y los datos de alta resolución, en la zona del Guadalfeo.

lores de los errores calculados para los índices WI1 y WI2 mostraron en general una mejor precisión, entre 0.25 y 0.5 píxeles.

A nivel sub-píxel, desde un punto de vista de la percepción visual no se observaron cambios perceptibles. Igualmente, a partir del análisis estadístico no se observó tampoco una mejora en la precisión como a priori era se esperaba.

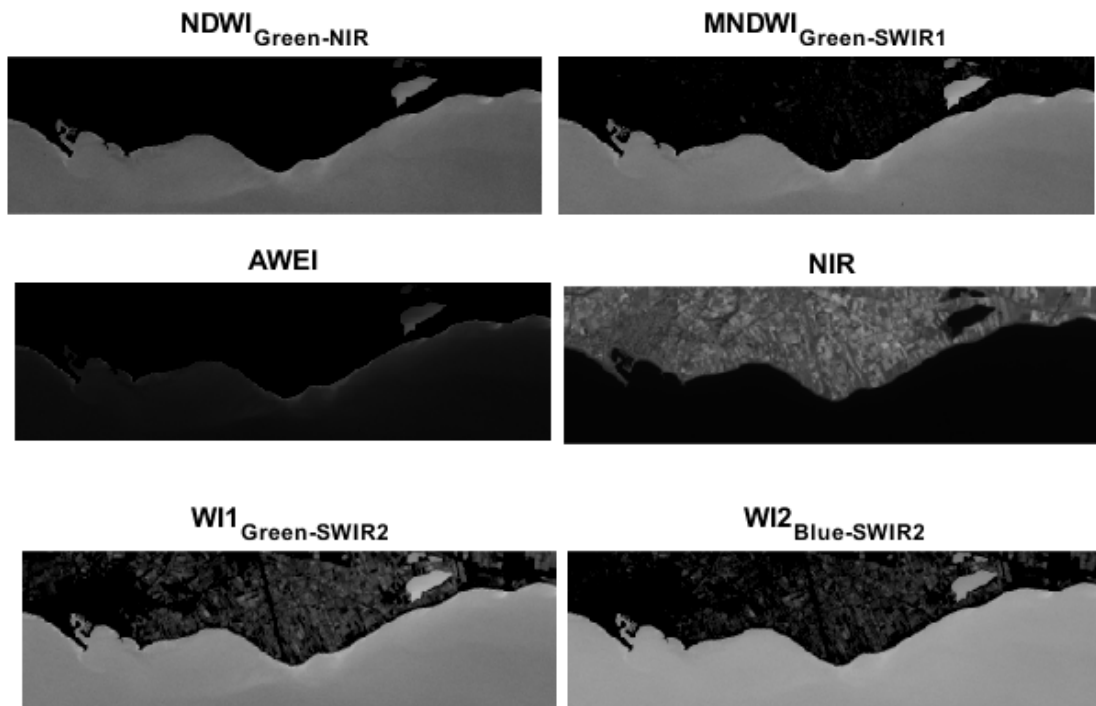
7.2 | Delta del Adra

En el delta del Adra, se mantuvo el comportamiento observado en el delta del Guadalfeo. Al calcular los índices, WI1 y WI2 mostraron mayor sensibilidad para detectar zonas ocupadas por invernaderos y/o vegetación (figura 7.6). Este comportamiento fue mucho más evidente en esta zona ya que la mayor parte de la llanura deltaica del Adra está dedicada al uso de invernaderos (Amrani-paaza et al., 2007; Pulido Bosch et al., 1988). Sin embargo, el contraste tierra-agua es ligeramente mejor utilizando los índices WI1 y WI2 (los píxeles de agua son ligeramente más claros que en resto de los índices).

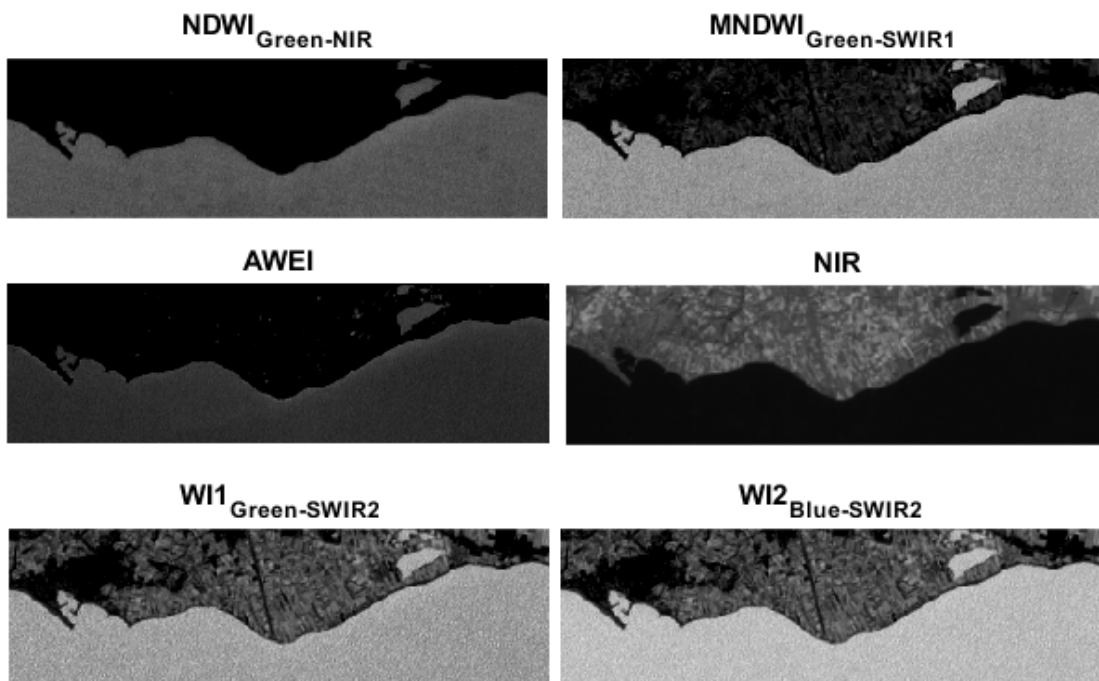
Adicional a la detección de zonas de invernaderos, también se observa la localización de dos lagunas interiores, que corresponden a la albufera Nueva y la albufera Honda (Amrani-paaza et al., 2007), lo que muestra en buen comportamiento del índice en la detección de cuerpos de agua. Después de aplicar todos los pasos del procesamiento, WI1 y WI2 nuevamente detectaron la LC suprimiendo el ruido de las zonas de vegetación/invernaderos y las lagunas interiores (ver figura 7.7).

La comparación visual para comprobar la efectividad de la metodología en esta zona mostró un comportamiento similar que en caso del Guadalfeo, siendo la banda del NIR y AWEI los índices con el más alto porcentaje de imágenes donde no fueron detectadas las LC de forma satisfactoria. En el caso del NIR, solo se detectó de forma satisfactoria la LC en un 37% del total de las imágenes seleccionadas en esta zona. Y AWEI no fue capaz de detectar la LC en el 33% del total de las imágenes seleccionadas y en otro 24% detectó la LC con ruido, siendo de poca utilidad.

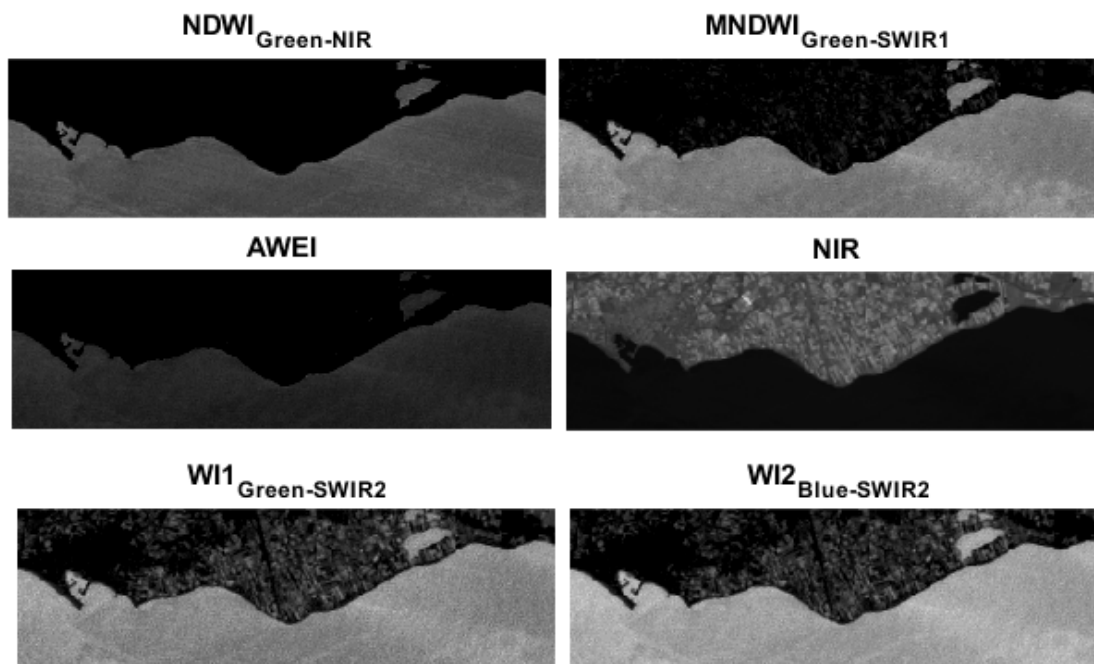
MNDWI, NDWI y WI1 no obtuvieron resultados satisfactorios en un 27%, 28% y 37% de las imágenes, respectivamente. Finalmente, el índice WI2 nuevamente fue el que mejor comportamiento presentó, obteniendo la LC en un 93% de total de imágenes seleccionadas. El resumen del número de imágenes, donde se obtuvieron de forma satisfactoria la LC con diferentes índices en esta zona de



(a) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor OLI el 8 de enero de 2016.



(b) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor ETM+ el 5 de febrero de 2000.



(c) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor TM el 15 de Julio de 2003.

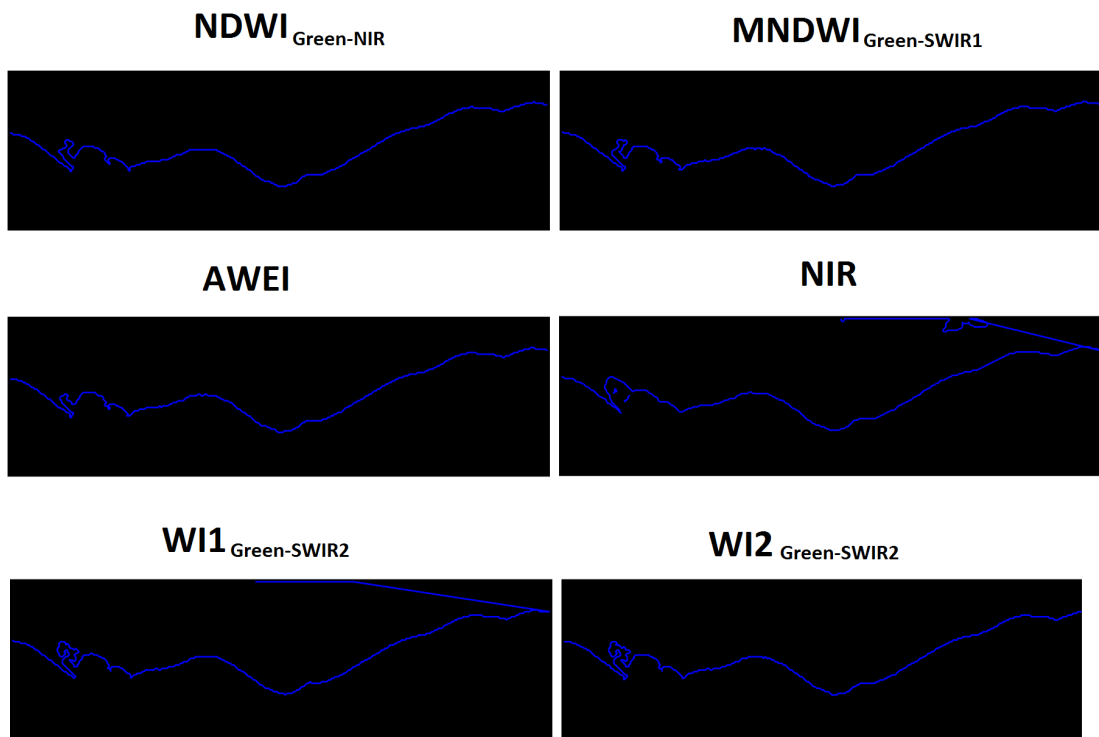
Figura 7.6: Índices calculados en imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Adra.

estudio, puede ser consultado en la tabla 7.2.

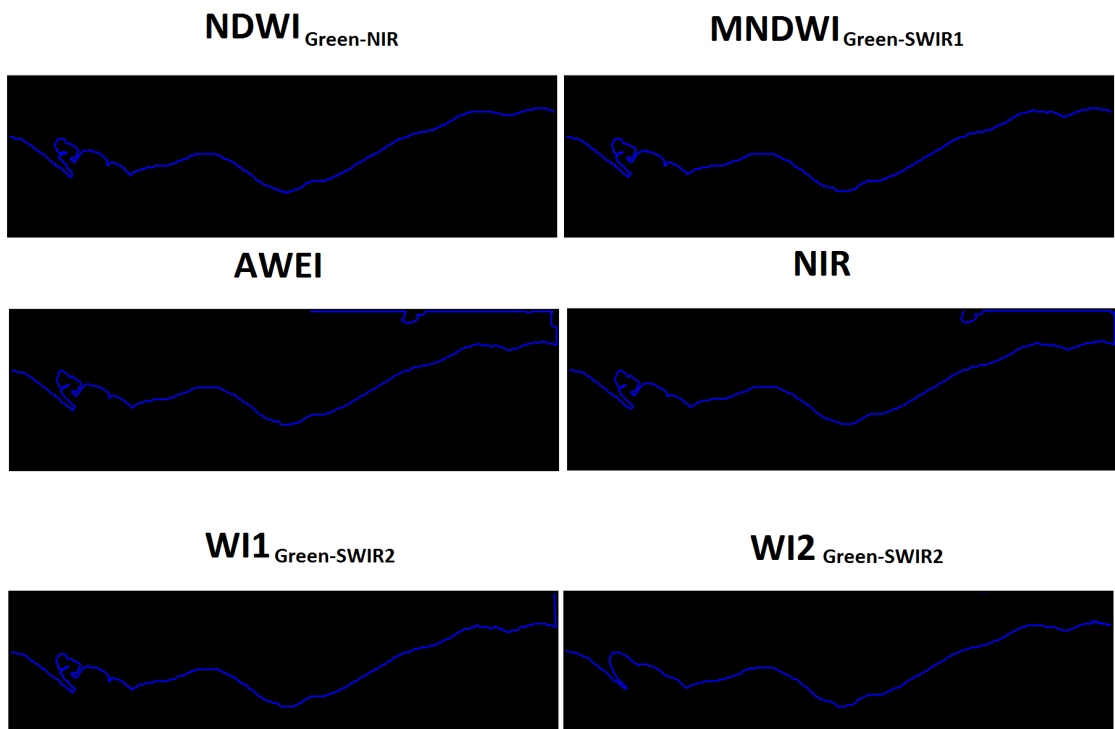
Tabla 7.2: Número de imágenes en donde se detectó correctamente la línea de costa, sin ruidos apreciables después de aplicar la metodología propuesta con los diferentes índices evaluados en el delta del río Adra.

Sensor	Imágenes	NDWI	MNDWI	AWEI	NIR	WI1	WI2
TM	61	39	39	25	23	26	56
ETM+	50	50	50	40	22	32	46
OLI	61	34	36	9	19	49	58

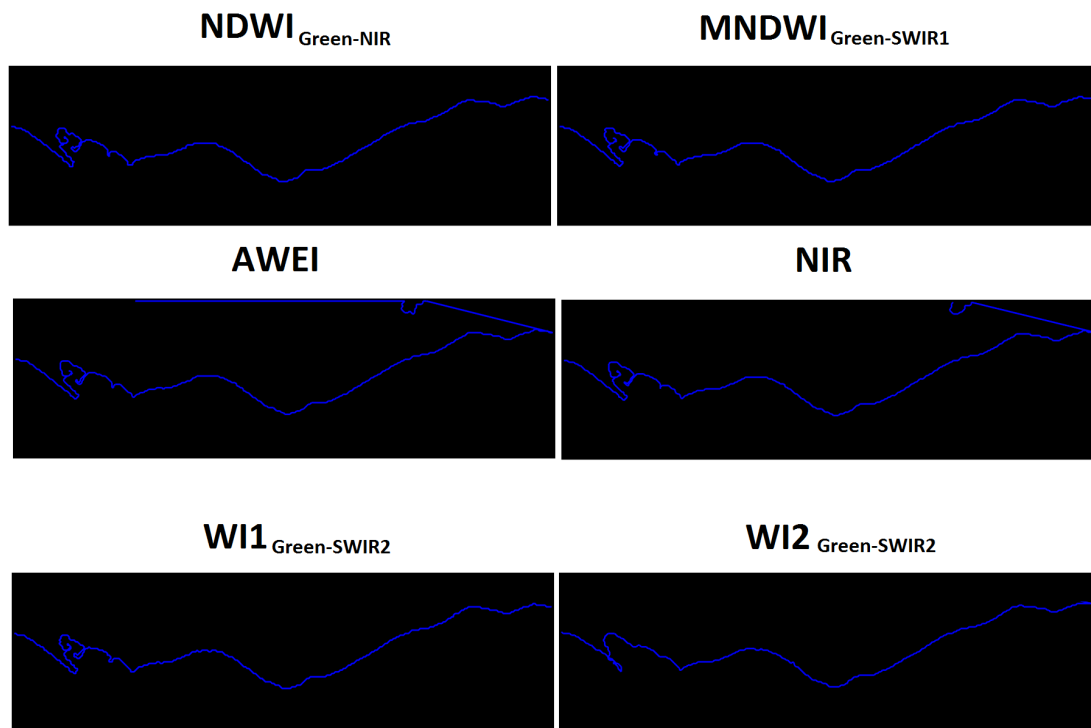
La figura 7.8 muestra ejemplos de los ruidos presentes en algunas de las imágenes en la zona del delta del Adra, con los distintos sensores analizados. En las subfiguras 7.8a, y 7.8e se muestran ejemplos de las líneas de costa extraídas de imágenes del sensor TM, en donde hay mucho ruido alrededor, con lo



(a) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor OLI el 8 de enero de 2016.



(b) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor ETM+ el 5 de febrero de 2000.



(c) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor TM el 15 de Julio de 2003.

Figura 7.7: Línea de costa extraídas de imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Adra.

que sería necesario realizar más operaciones de procesamiento si se quisieran obtener datos fiables. Sin embargo, esto desvirtuaría la naturaleza automática de la metodología perdiendo eficacia y utilidad. En la subfigura 7.8c se muestra un ejemplo de la incapacidad de AWEI para detectar la LC. Estos casos no resultan ventajoso en una metodología automática.

7.2.1 | Análisis de la precisión

En el apéndice B se muestra la tabla B.2 con los resultados del análisis estadístico (media y desviación estándar), tanto a nivel pixel (resolución espacial original) como a nivel sub-pixel (resolución espacial de las imágenes interpolada a diferentes factores). En la figura 7.9 se muestran las variaciones verticales de las

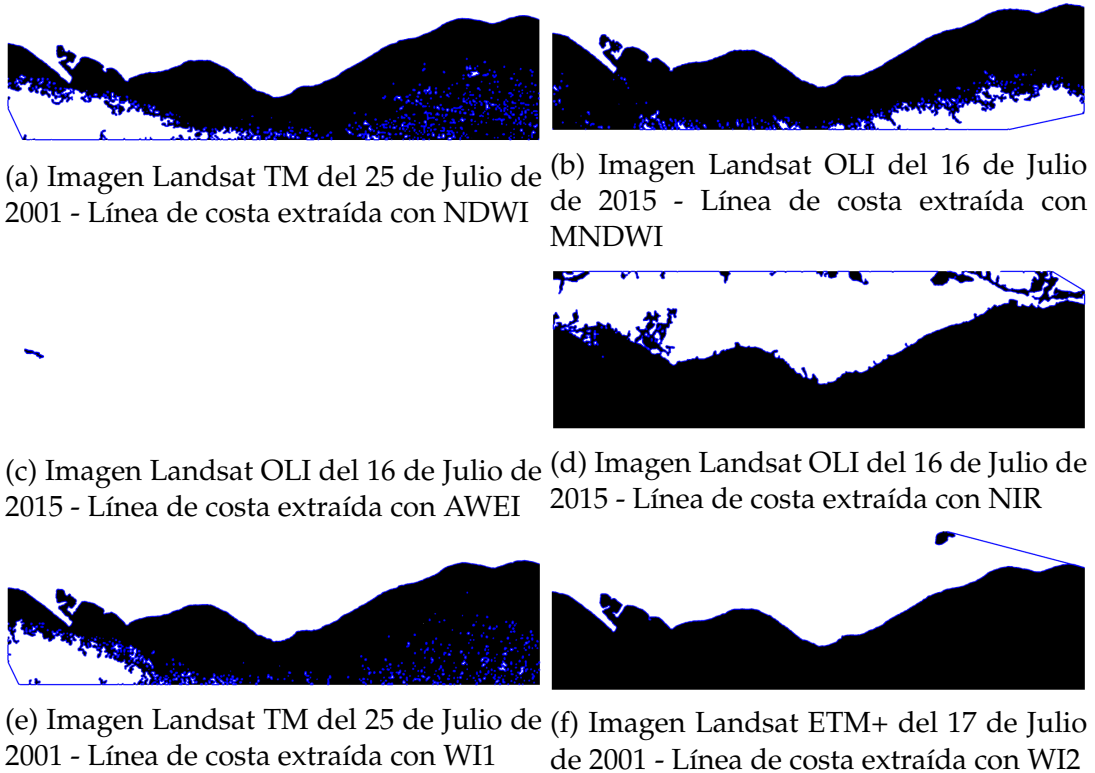
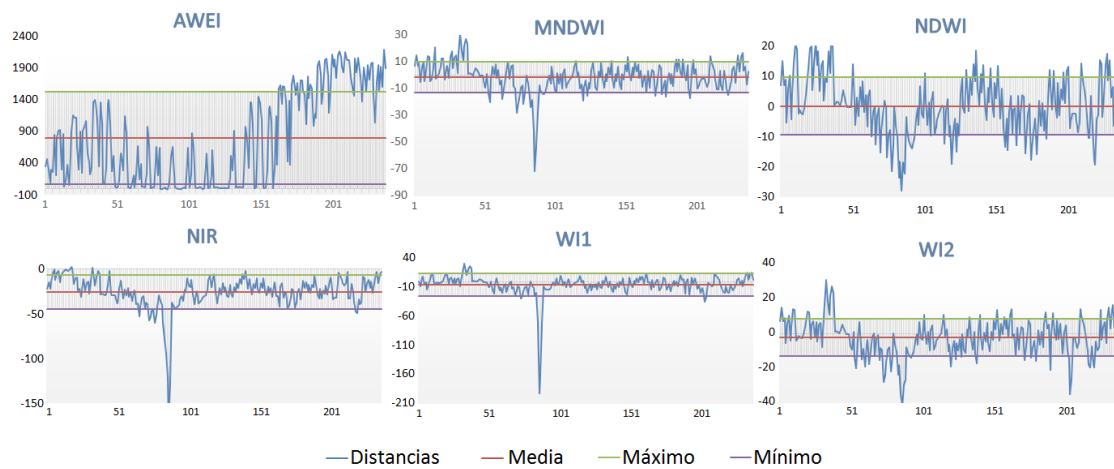


Figura 7.8: Ejemplo de algunos errores detectados después de aplicar la metodología a las imágenes seleccionadas en el delta del río Adra. Cada una de las subfiguras muestra el resultado de extraer la línea de costa de la imagen Landsat TM del 25 de Julio de 2001 a partir de los distintos índices espectrales.

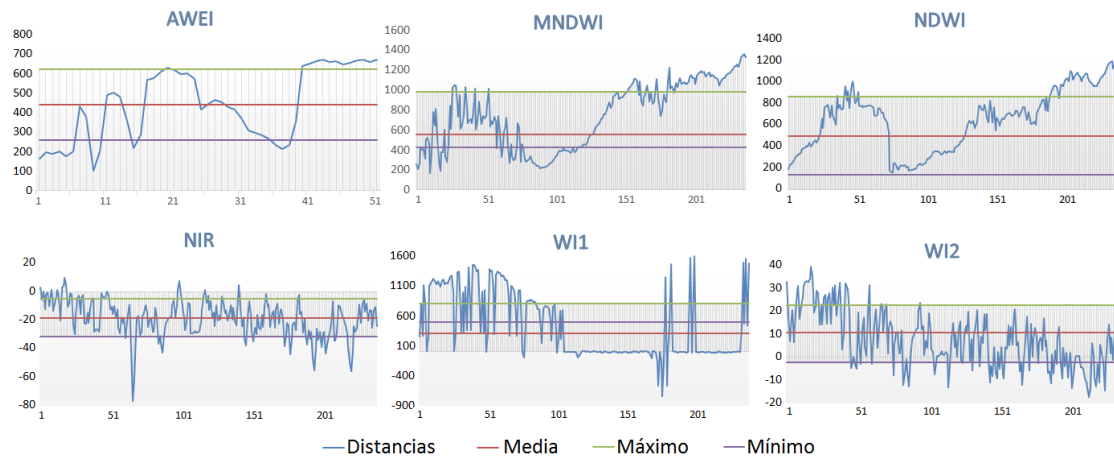
coordenadas de la LC detectadas en las imágenes Landsat con respecto a la LC extraída de los datos de alta resolución.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta zona, AWEI no tuvo ningún resultado útil para ninguna de las fechas evaluadas, ya que o no detectó la LC al final del procesamiento (como se puede observar en los resultados obtenidos de la imagen del 2 de Julio de 2016), o detectó mucho ruido adicional haciendo el resultado ineficaz.

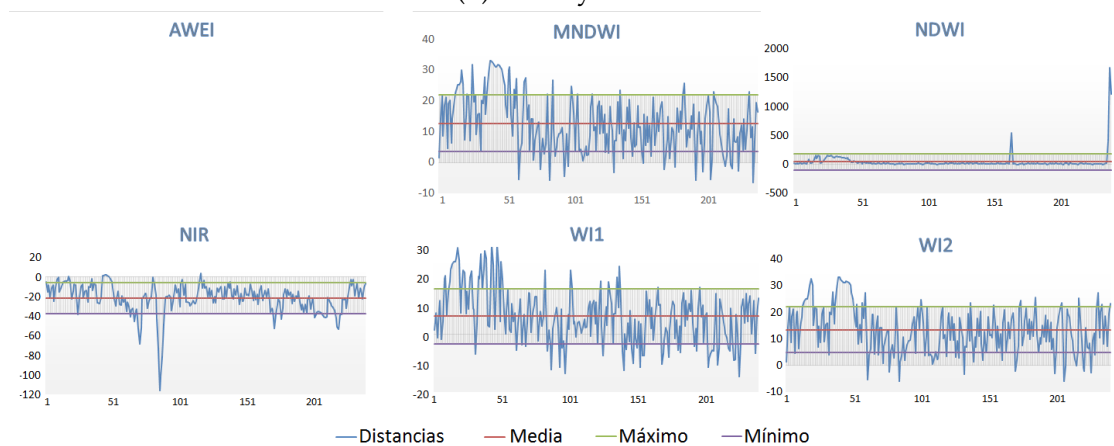
Los únicos dos índices que obtuvieron resultados sin ruido apreciable en esta zona de estudio fueron NIR y WI2. Sin embargo, NIR obtuvo errores de pre-



(a) 18 Julio 2010



(b) 23 Mayo 2013



(c) 2 Julio 2016

Figura 7.9: Gráficas de las distancias verticales con sus respectivos valores medios y desviación estándar, entre la línea de costa a partir de las imágenes Landsat y los datos de alta resolución, en la zona del Adra.

cisión mayores que WI2. La mayoría de las distancias verticales estaban en el rango entre mínimo 5.68m y máximo 45m hacía la zona terrestre. Mientras, las diferencias verticales obtenidas con WI2 en su mayoría estaban entre los 4.3m y los 21m, lo cual es más aceptable teniendo en cuenta la resolución de las imágenes.

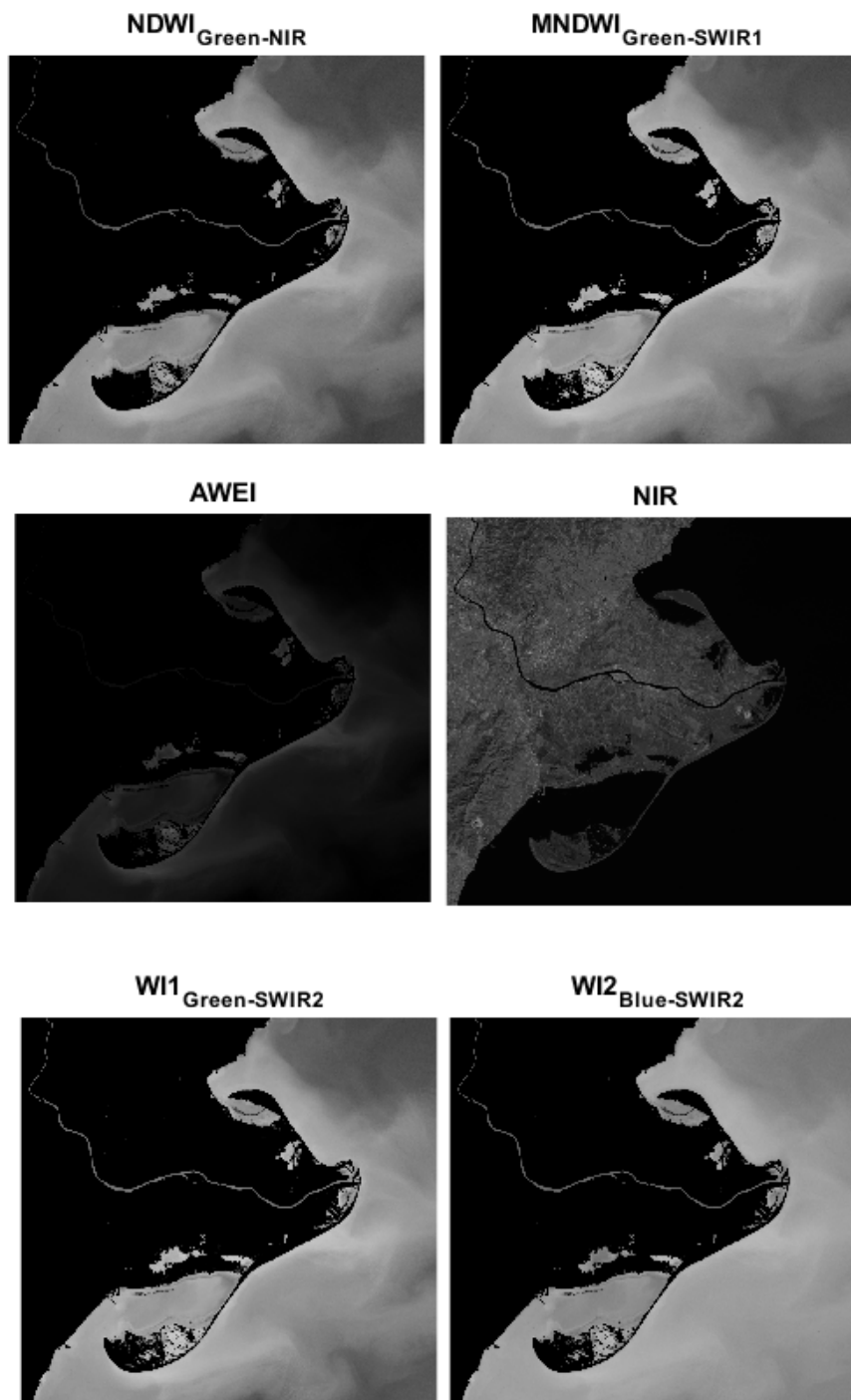
MNDWI, NDWI y WI1 en algunas fechas presentaron demasiado ruido ocasionando errores excesivamente altos. Para esta zona de estudio, WI2 también es el índice que mejor resultado muestra, ya que en las tres fechas evaluadas los errores son menores al pixel.

7.3 | Delta del Ebro

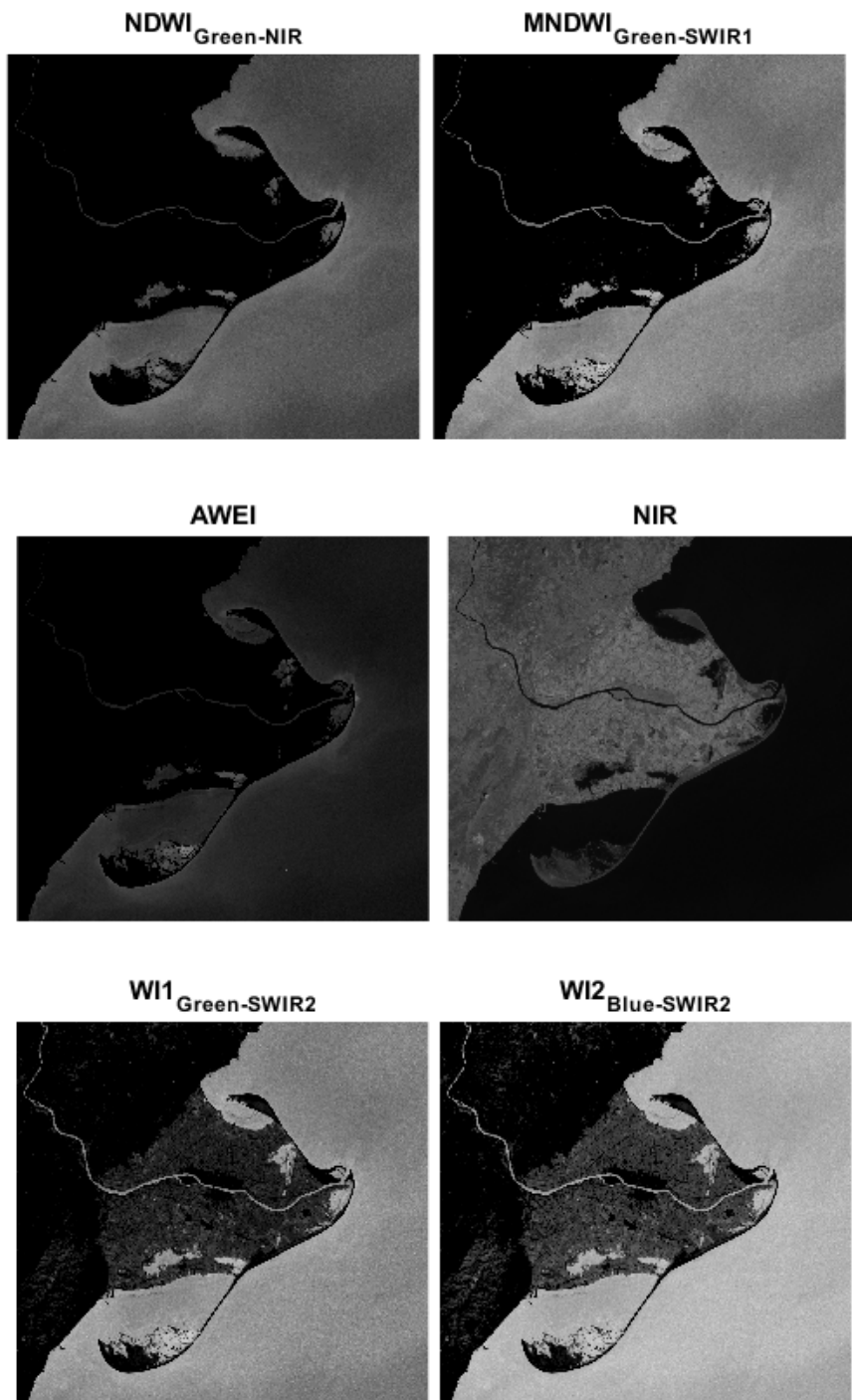
El delta del Ebro es una area más compleja en cuanto a la caracterización morfológica debido a la presencia de lagunas costeras, las salinas y las largas y estrechas barras de arena. En esta zona la metodología con los índices propuestos WI1 y WI2 también fue capaz de detectar la LC.

Al calcular los índices espectrales WI1 y WI2, sigue manteniéndose la capacidad del algoritmo de detectar también las zonas de vegetación y de agua interior excepto en las imágenes captadas con el sensor OLI, en las cuales sí se suprime tanto las construcciones como las zonas de vegetación. Sin embargo, como en las zonas del Guadalfeo y del Adra, al continuar con el resto de los pasos del procesamiento (la segmentación y operaciones morfológicas), se suprime dichas zonas y detecta la LC del delta, cumpliendo con el objetivo. Esto puede observarse en las figuras 7.10 y 7.11.

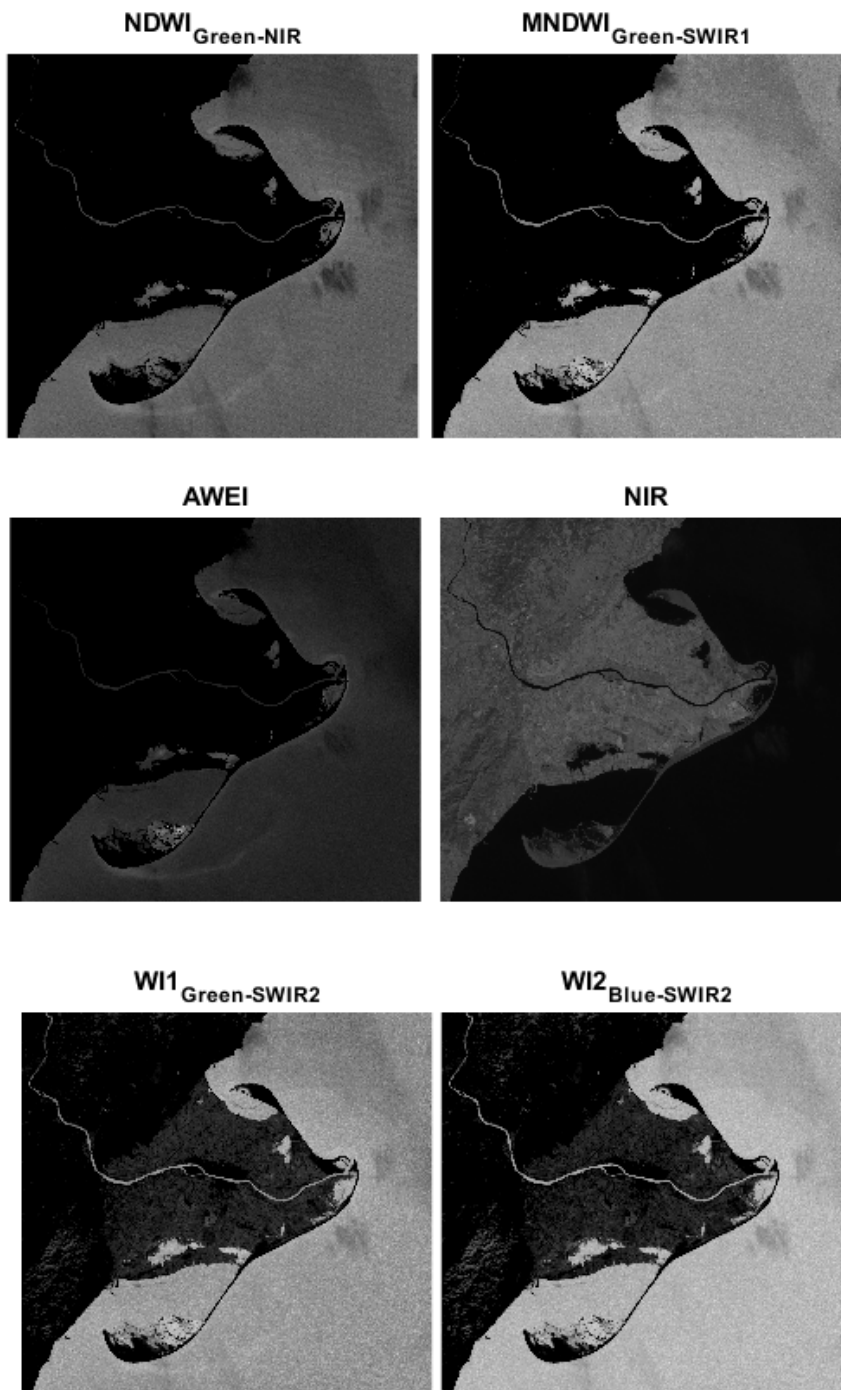
Se realizó una comparación visual de todas las imágenes seleccionadas en esta zona con cada uno de los índices evaluados. Nuevamente se observó que NIR y AWEI fueron los índices más deficientes en detectar la LC en el delta del Ebro. En el caso de la banda NIR, detectó la LC en solo un 31% de las imágenes, el resto tenían ruido o errores. AWEI no logró extraer la LC en un 17% de las imágenes y en un 50% detectó demasiado ruido alrededor haciendo los resulta-



(a) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor OLI el 8 de enero de 2016.

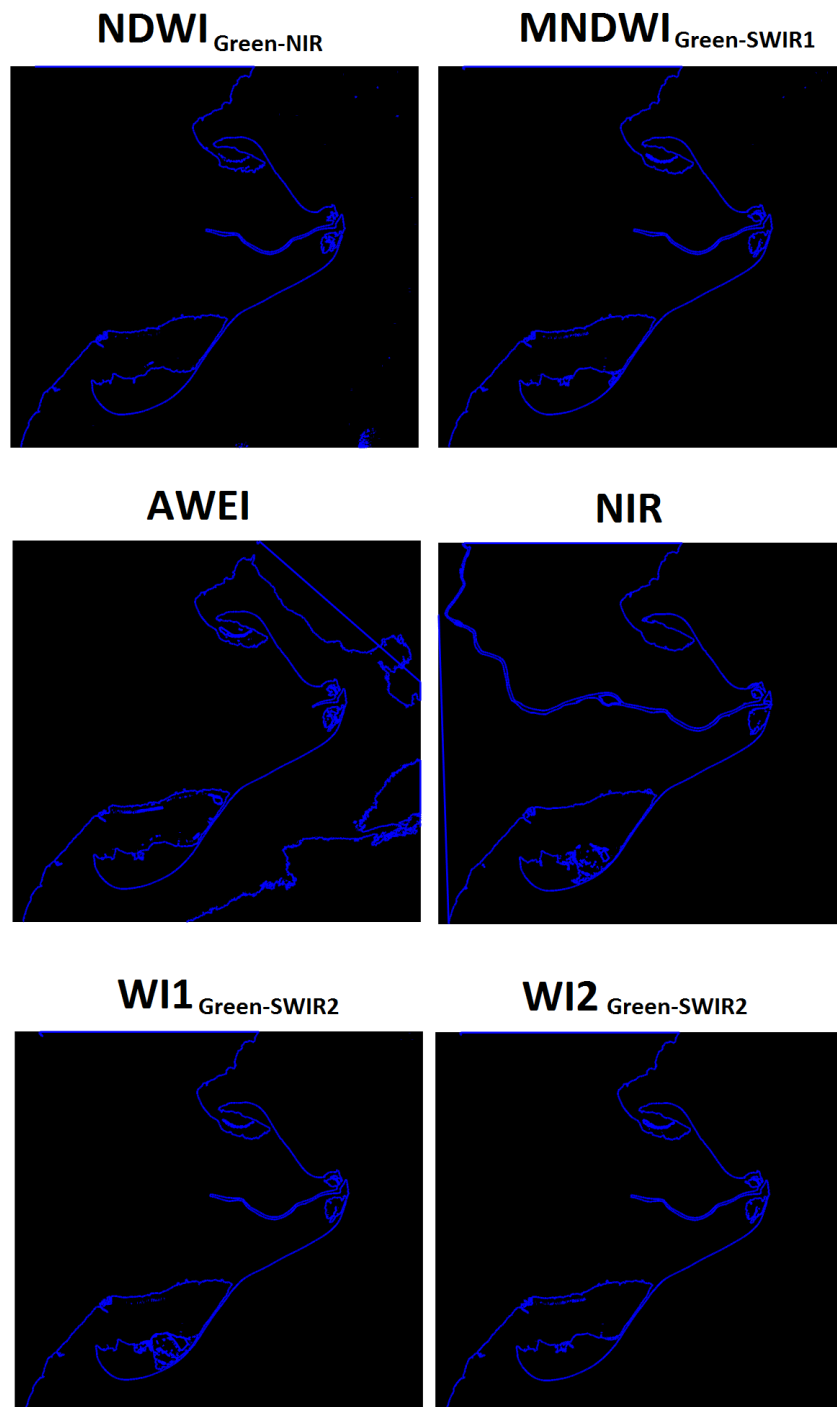


(b) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor ETM+ el 5 de febrero de 2000.

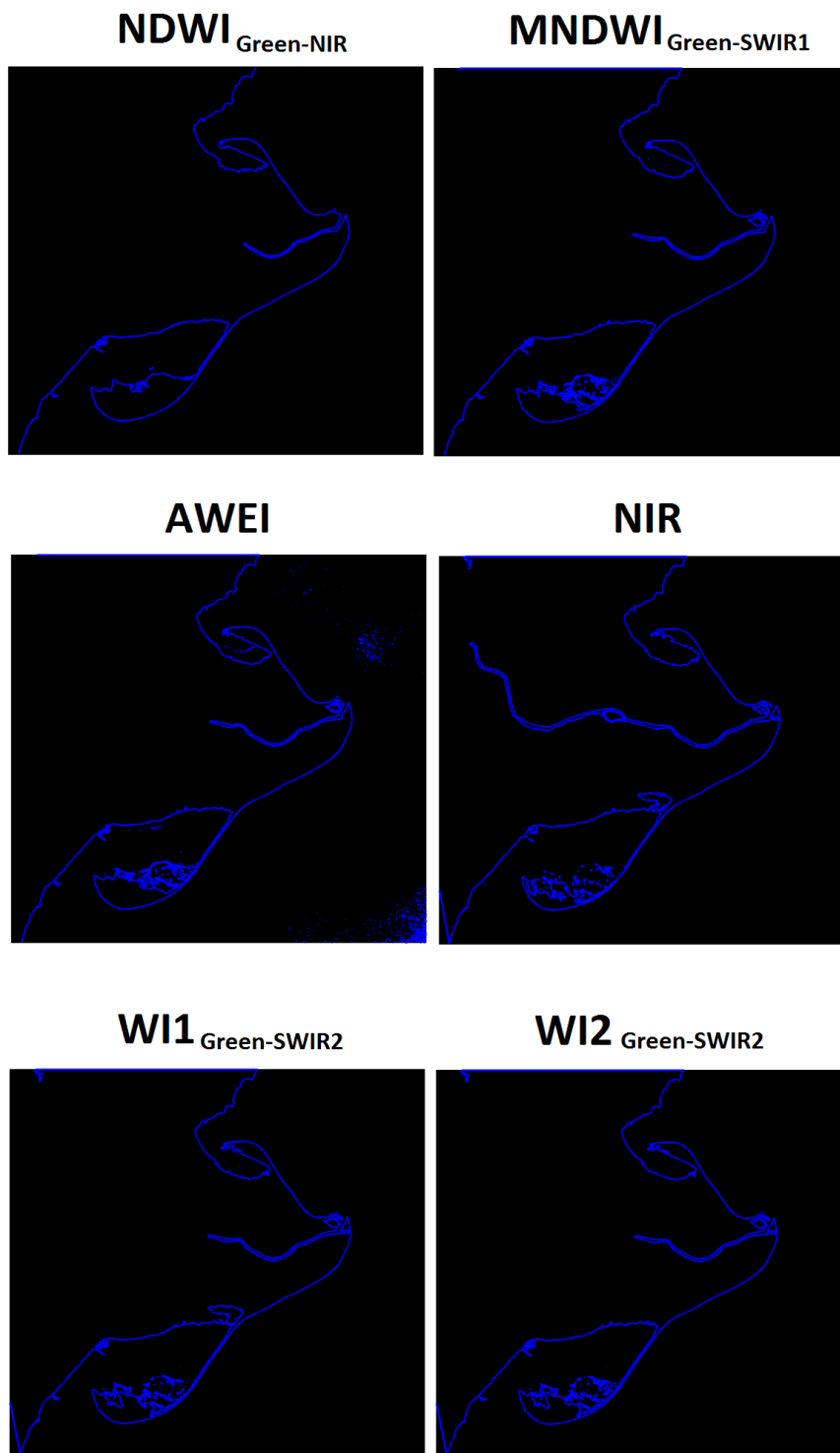


(c) Cálculo de los índices para la imagen capturada con el sensor TM el 15 de Julio de 2003.

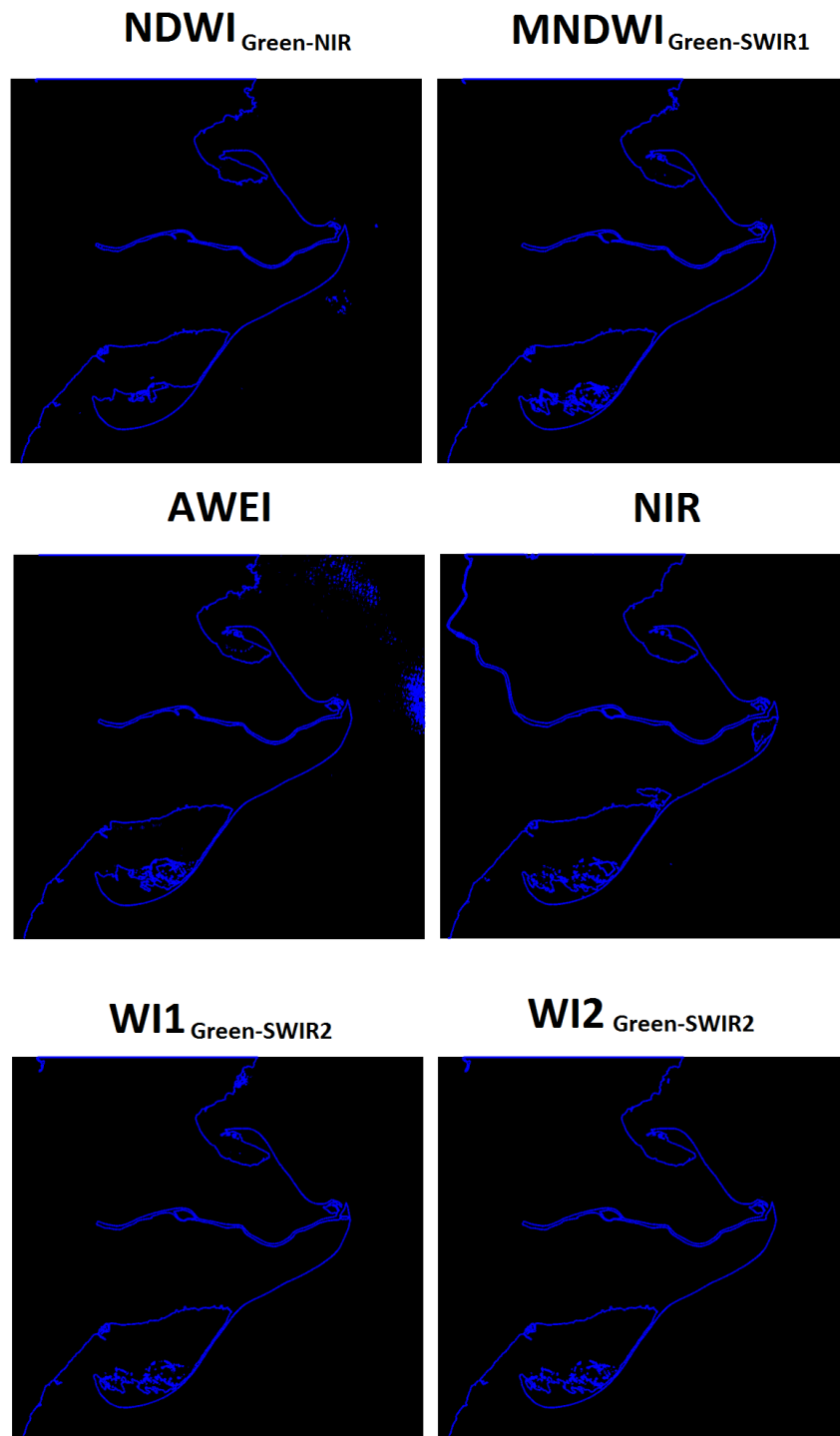
Figura 7.10: Índices calculados en imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Ebro.



(a) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor OLI el 8 de enero de 2016.



(b) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor ETM+ el 5 de febrero de 2000.



(c) Líneas de costa detectadas en la imagen capturada con el sensor TM el 15 de Julio de 2003.

Figura 7.11: Línea de costa extraídas de imágenes captadas con diferentes sensores en la zona del delta del Ebro. 107

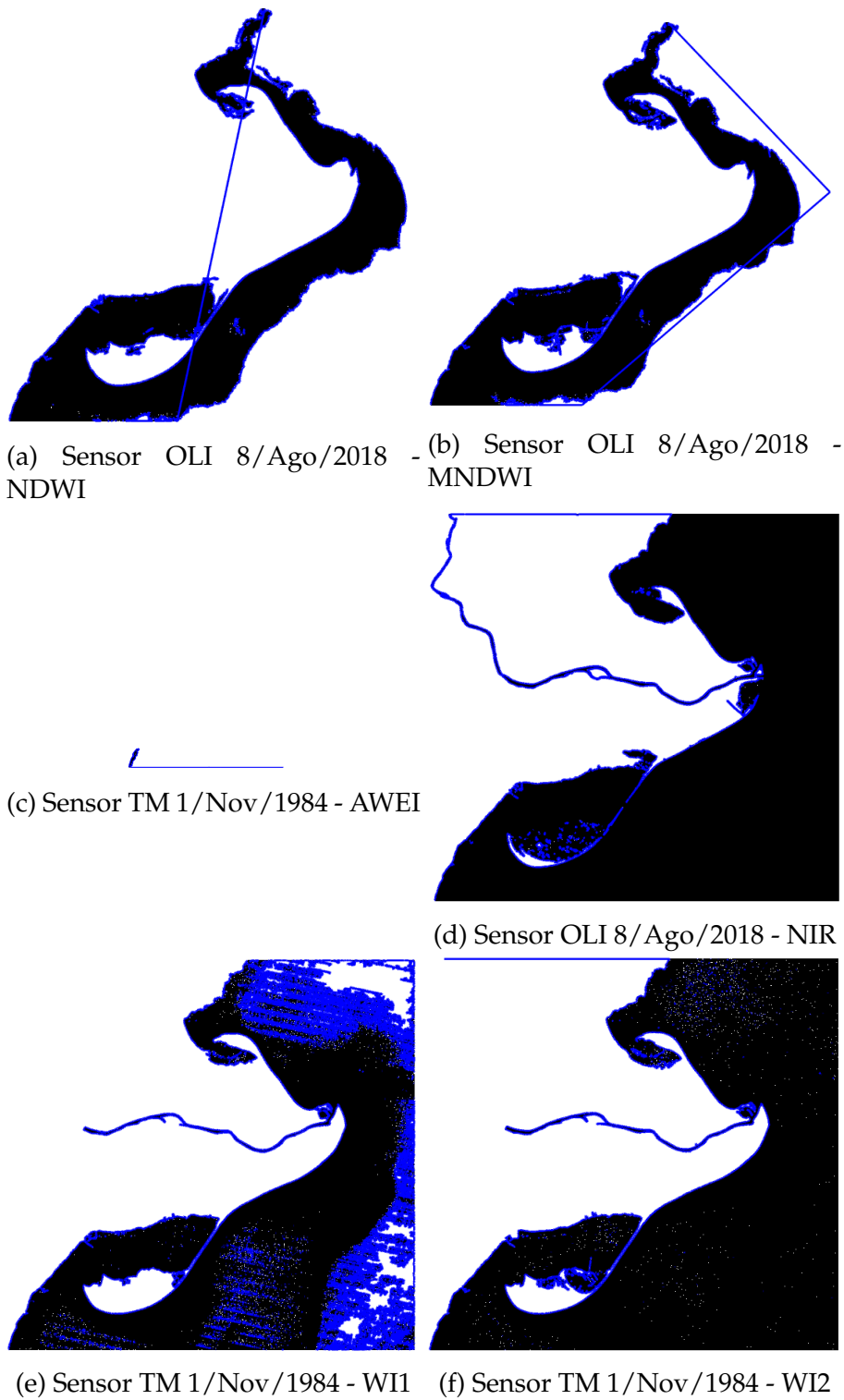


Figura 7.12: Ejemplo de algunos errores detectados después de aplicar la metodología a las imágenes seleccionadas en el delta del río Ebro con los distintos índices evaluados.

Tabla 7.3: Número de imágenes en donde se detectó correctamente la línea de costa, sin ruidos apreciables después de aplicar la metodología propuesta con los diferentes índices evaluados en el delta del río Ebro.

Sensor	Imágenes	NDWI	MNDWI	AWEI	NIR	WI1	WI2
TM	45	24	24	17	13	24	35
ETM+	104	104	104	43	18	104	104
OLI	36	7	8	0	0	8	32

dos ineficientes. Con lo cual, solo pudo detectar de forma útil la LC del delta en un 33% de las imágenes seleccionadas.

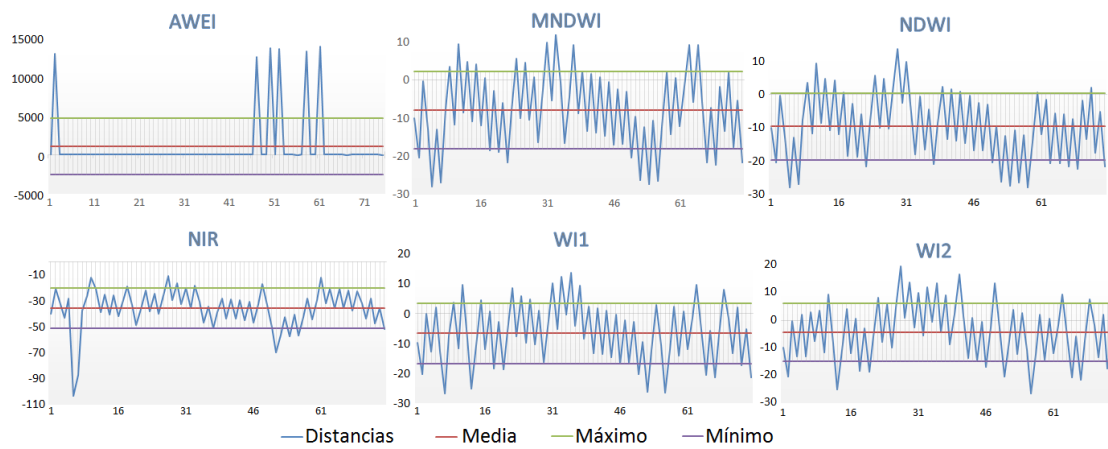
Los índices NDWI, MNDWI y WI1 obtuvieron el mismo porcentaje de efectividad de detección, siendo capaces de detectar la LC en un 73% de las imágenes seleccionadas. WI2 fue el índice más efectivo en detectar la LC, detectándola en un 96% de las imágenes. En el 100% de las imágenes detectadas por el sensor ETM+ se pudo detectar la LC utilizando estos últimos 4 índices.

En la tabla 7.3 se puede ver un resumen de las imágenes en las que se pueden obtener la LC sin ruidos, con cada uno de los índices de acuerdo a los sensores utilizados y la figura 7.12 muestra ejemplos de los ruidos presentes en las imágenes de la zona del delta del Ebro.

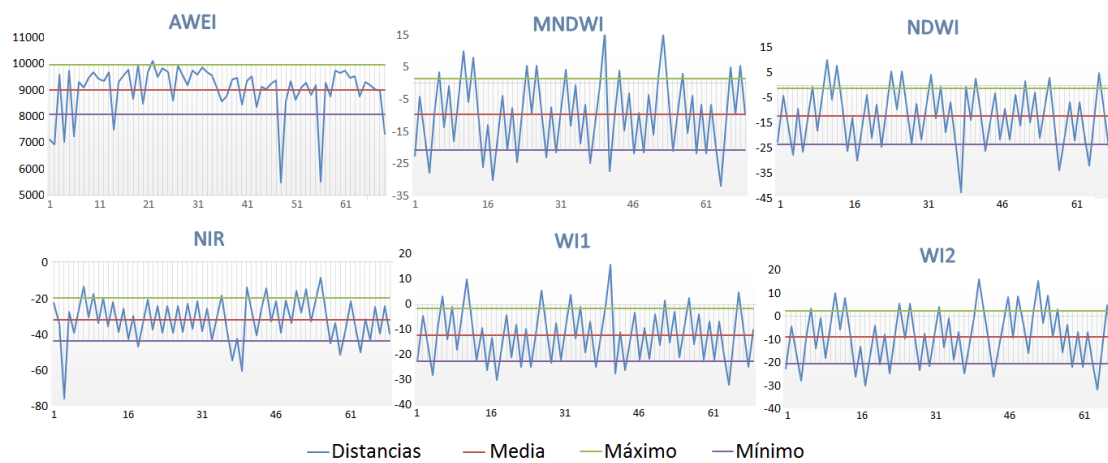
7.3.1 | Análisis de la precisión

En el apéndice B se muestra la tabla B.3 con los resultados del análisis estadístico (media y desviación estándar), tanto a nivel pixel (resolución espacial original) y a nivel sub-pixel (resolución espacial de las imágenes interpolada a diferentes factores). En la figura 7.13 se muestran las variaciones verticales de las coordenadas de la LC detectadas en las imágenes Landsat con respecto a la LC extraída de los datos de alta resolución.

Los resultados obtenidos en esta zona son consistentes con las otras dos evaluadas. Tanto a nivel pixel como sub-pixel (interpolación bicúbica), AWEI sigue



(a) 13 Agosto 2007

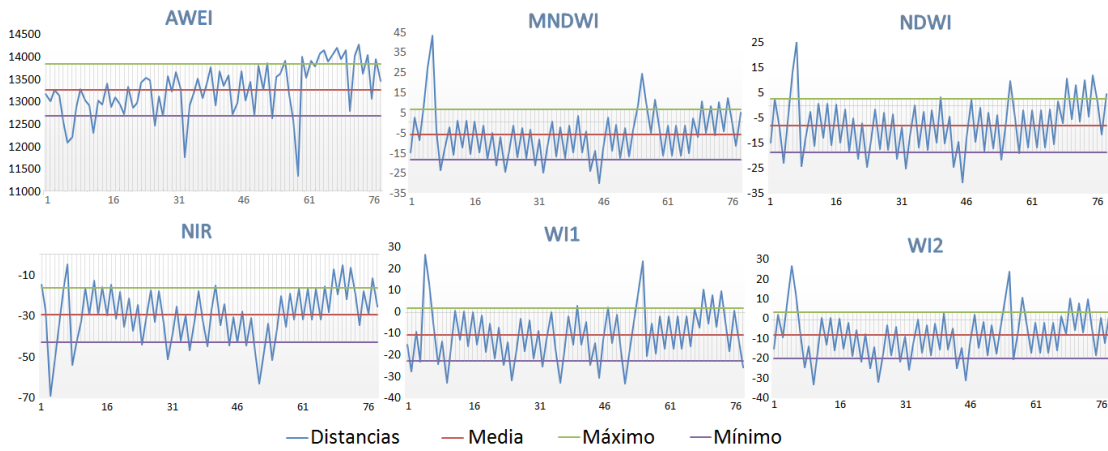


(b) 20 Junio 2008

siendo el índice con peor desempeño estadístico, en ninguna de las tres fechas utilizadas para analizar la precisión logró extraer satisfactoriamente la LC.

A nivel pixel, los resultados obtenidos con la banda del NIR sobrepasa la resolución del pixel (30m). El resto de índices tienen resultados de error similares, aunque la media de la diferencia de las distancias es ligeramente menor con el índice WI2.

A nivel sub-pixel (después de la interpolación bicúbica), se observó un mejoramiento en la precisión de la posición de la LC hasta el factor 5, es decir, un



(c) 15 Junio 2012

Figura 7.13: Gráficas de las distancias verticales con sus respectivos valores medios y desviación estándar, entre la línea de costa a partir de las imágenes Landsat y los datos de alta resolución, en la zona del Ebro.

tamaño de pixel de 6m. En esta zona la interpolación bicúbica, aparentemente, produce un mejoramiento en la resolución. Sin embargo, esto necesita ser estudiado más a fondo, ya que en las otras dos zonas no se apreció tal incremento en la precisión.

7.4 | Discusión de los Resultados

En términos generales, al analizar la efectividad de la metodología con cada índice por separado para detectar la LC sin ruidos o errores apreciables, sobresale el desempeño del índice WI2 sobre el resto de índices evaluados. Este índice detectó la LC en un 96% de las imágenes analizadas (incluyendo las tres zonas de estudio). AWEI y la banda del NIR fueron los de peor desempeño, detectando la LC solo en un 48% y 29%, respectivamente. El resto de índices tuvieron resultados similares (NDWI, 77%; MNDWI, 76% y WI1, 77%).

La metodología propuesta utilizando los índices WI1 y WI2 fue capaz de detectar la línea de separación tierra-agua en las tres zonas analizadas, aunque estos mismos índices fueron los más sensibles para detectar zonas de vegetación

y/o invernaderos en el paso inicial del cálculo de tales índices. La explicación de tal comportamiento puede estar relacionado por un lado con la utilización de las bandas del azul y el verde que se utilizan para detectar los plásticos de los invernaderos (Aguilar et al., 2019), y por otro lado, con que usan la banda SWIR2 y ésta suele utilizarse para detectar el contenido de humedad en suelo y vegetación (Li et al., 2016; USGS, 2016). Sin embargo, estos índices combinados con la segmentación con el método de Otsu fueron capaces de suprimir las zonas de edificios y zonas de playa cercana a la costa, lo cual es crítico para dividir los píxeles correspondientes al agua de aquellos que no lo son en las zonas deltaicas.

Las diferencias encontradas entre las imágenes OLI y las TM/ETM+ puede ser debido a las diferencias técnicas entre los sensores. El sensor OLI tiene una mejor resolución espectral, un rango dinámico de 12-bit y un mayor RSN (signal-to-noise ratio). Adicionalmente, en el sensor OLI, las bandas SWIR1 y SWIR2 son mucho más estrechas que las mismas bandas en el sensor TM/ETM+ para evitar algunas condiciones de atenuación atmosféricas, lo que implica que discriminan mejor el contraste sobre las superficies terrestres (Alhirmizy, 2015; Flood, 2014; Li et al., 2013).

En relación con muchos de los errores o ruidos presentados después de aplicar la metodología propuesta se observó que, una vez aplicada la segmentación (con los diferentes índices evaluados), sólo los píxeles más cercanos a la costa los clasificaban como píxeles correspondientes a agua (píxeles más claros), mientras que en zonas de aguas con mayor profundidad muchos píxeles eran clasificados erróneamente como tierra (píxeles más oscuros). Este comportamiento entorpecía el correcto funcionamiento del método de segmentación (Otsu) para separar correctamente los píxeles de agua y tierra. Esto no ocurría con las LC detectadas con el índice WI2, que puede ser debido a la ventajosa capacidad de penetración de la banda del azul en el agua (Tang and Mahmud, 2018), siendo ésta una de las razones por las que esta longitud de onda es utilizada en aplicaciones de mediciones batimétricas (Pacheco et al., 2015). Otra razón puede estar relacionada con el comportamiento espectral de los componentes químicos del agua del mar. Por ejemplo, el fitoplancton tiene una alta capacidad de absor-

ción en la banda del azul pero alta reflectancia en el verde. La materia orgánica disuelta también absorbe más en la longitud de onda correspondiente al azul (Huthmacher and Muller-Karger, 1999). Es posible que esto contribuya al desempeño mejor desempeño del índice para no tener tanto ruido en la zona del mar.

A nivel sub-píxel se esperaba que al hacer la interpolación bicúbica la metodología aplicada permitiera obtener un mejor nivel de detalle de la LC, mejorando su precisión. Sin embargo, los resultados mostraron que este tipo de interpolación no resulta de mayor utilidad para la detección de la LC con esta metodología. Por lo tanto, se hace necesario evaluar otras alternativas más complejas de análisis sub-píxel.

En general, al comparar los resultados obtenidos en las tres zonas, mediante la inspección visual de la efectividad en la detección, teniendo en cuenta solo los índices utilizados en la literatura (NDWI, MNDWI, AWEI y NIR), se observó que, en el caso del Guadalfeo el que mejor resultado mostró fue el NDWI. En el caso del Adra y del Ebro, tanto NDWI como MNDWI tuvieron desempeños similares, siendo los más efectivos de los cuatro. Si se compraran los resultados estadísticos relacionados con la precisión de estos mismos índices, se observó que el índice NDWI tuvo un desempeño ligeramente mejor, mientras que en delta del Adra fue la banda del NIR y en el delta del Ebro, el MNDWI. Por lo tanto, ninguno de los índices comúnmente utilizados, evaluados en esta investigación, muestra un comportamiento estable de efectividad en las tres zonas, siendo ésta la principal razón por la cual es conveniente definir un nuevo índice que pueda ser generalizado. En contraste, WI2 fue el que mejor desempeño realizó en las tres zonas de estudio, tanto en la efectividad de detección como en la precisión.

Finalmente, en este Capítulo se ha mostrado que la metodología propuesta con el índice WI2 representa una gran alternativa para la detección automática de la LC, ya que fue el único índice capaz de detectar la LC casi en todas las imágenes analizadas (96% de 621 imágenes) a diferencia del resto de índices

analizados, obteniendo valores satisfactorios de errores muestrales al ser comparado con los resultados de datos de alta resolución (en algunas fechas se alcanzaron errores de -0.91 ± 7.3 , -2.27 ± 10.7 y -4.32 ± 10.5 , para el delta del Guadalfeo, Adra y Ebro, respectivamente). Además, cabe resaltar que ha podido ser utilizado en distintas zonas, que tienen distintos tipos de cobertura y con imágenes proveniente de sensores diferentes manteniendo la efectividad. Esto hace que se pueda aprovechar al máximo la extensa base de datos de proyectos como Landsat, constituyendo así una importante ventaja cuando se hace necesario realizar análisis temporales de LC.

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

8.1 | Conclusiones

Objetivo General

El objetivo general planteado en esta tesis fue proponer un nuevo índice espectral de aplicación en una metodología de detección automática de línea de costa a mediana escala espacio-temporal, para contribuir al conocimiento de los procesos relacionados con los cambios morfológicos en ambientes deltaicos a través de técnicas de teledetección. Para alcanzarlo se realizó primero una revisión del estado del arte relacionado con la teledetección y se profundizó en los parámetros básicos requeridos para escoger un sistema de teledetección acorde con los objetivos de la investigación. Posteriormente se seleccionaron tres zonas de estudios con características micro-mareales, cuyas imágenes fueron analizadas espectralmente para el planteamiento del nuevo índice que pudiera ser de aplicación generalizada. Finalmente se diseñó un sencilla interfaz gráfica de procesamiento para las imágenes seleccionadas en las zonas de estudio que permitiera extraer automáticamente la línea de costa utilizando la metodología basado principalmente en el calculo del índice espectral y segmentación por umbralización.

Las conclusiones obtenidas se desglosan en correspondencia con los objetivos específicos descritos en la sección 1.4. tal y como se describen a continuación.

Objetivo Específico 1

Comprender los principios básicos de la teledetección, su importancia y las distintas aplicaciones de esta tecnología.

La teledetección se basa en las leyes del electromagnetismo y sus principios básicos, con las aportaciones de Plank y Einstein sobre el comportamiento dual de la luz, siendo éstas las principales teorías utilizadas para el diseño de los distintos sensores que detectan la longitud de onda electromagnética. Teniendo en cuenta que a mayor longitud de onda, el contenido energético será menor, esto implica que es más difícil detectar las radiaciones de longitudes de onda larga, requiriendo sistemas de detección más sofisticados. Esta es una de las razones por las que tecnologías basadas en longitudes de onda corta son ampliamente utilizadas.

Otro aspecto a tener en cuenta es la interacción de la energía electromagnética con la atmósfera y la superficie terrestre, ya que influye en la calidad de los datos obtenidos de las mediciones. Por ello, es necesario comprender dicha interacción con el fin de seleccionar adecuadamente los tipos de sensores para obtener los datos que necesitan ser analizados y el tipo de pre-procesamiento requerido para obtener la información física deseada.

Cabe destacar que la teledetección esta siendo utilizada en un amplio abanico de campos científicos, lo que está permitiendo obtener información con el fin de mejorar nuestro conocimiento sobre el entorno de una manera rápida, eficaz y eficiente (lo que en muchos casos se traduce en ahorro de recursos económicos).

Objetivo Específico 2

Analizar el estado del arte sobre las distintas técnicas de la teledetección para detallar los principales aspectos a tener en cuenta al seleccionar la técnica óptima conforme a la

tecnología y recursos disponibles.

Para realizar cualquier proyecto que se base en datos captados con esta tecnología es necesario tener claro como punto de partida ciertos parámetros básicos tales como: el objeto de estudio, el tipo de energía electromagnética donde dicho objeto puede ser más eficazmente estudiado, el tipo de imagen satelital y sus resoluciones, lo que está relacionado con el tipo de plataforma donde se encuentre el sensor, y por último pero no menos importante, la fuente de adquisición de dichos datos.

Dada la relación entre sí de los parámetros mencionados, la obtención de los datos físicos requeridos en la investigación que se lleve a cabo, dependerá en gran medida de la combinación idónea de todos ellos, teniendo claro la importancia de cada uno. Así, al conocer el comportamiento espectral del objeto que se desea estudiar, se sabrá en qué longitud de onda es más probable obtener las propiedades físicas requeridas para el estudio, de esta forma se podrá escoger los sensores y el tipo de imagen más apropiada de acuerdo al objetivo del estudio. Obviamente esto está condicionado con la resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica que haya disponible en el mercado, que a su vez dependerá de los recursos económicos con los que cuente el proyecto para acceder a datos de baja, mediana o alta resolución. En muchos casos, en los que no se cuente con suficientes recursos económicos, se hará necesario sacrificar una alta resolución espacial y temporal para ajustarse al presupuesto, obteniendo los datos a través de fuentes de libre acceso, con el fin de llevar a cabo la investigación con las consecuentes limitaciones de precisión, pero que, según el caso puede llegar a ser suficiente. En otros casos, se pueden acceder a datos de mejor resolución espacial a través de fuentes de libre acceso como son las imágenes provistas por el proyecto multi-satélite *Sentinel*, pero restringiendo el rango temporal de los datos disponibles, ya que estos satélites entraron en funcionamiento a partir de 2014.

Objetivo Específico 3

Seleccionar el sistema de teledetección apropiado según el tipo de imagen efectiva, para la detección de línea de costa en zonas micro-mareales y construir una base de datos que pueda ser aprovechada en futuras investigaciones

Teniendo en cuenta los parámetros mencionados y los recursos disponibles en esta investigación, se han seleccionado imágenes multiespectrales debido a su gran capacidad de almacenamiento de datos y la alta disponibilidad de imágenes repetidas de un mismo lugar en distintas fechas cubriendo posiblemente todo el planeta. Estas razones las hacen altamente útiles en estudios de evolución a mediano y largo plazo, en contraste con las herramientas usualmente utilizadas como son las campañas de campo y fotografías aéreas, que aunque aportan una alta precisión resultan ser altamente costosas y con restricciones de tiempo y espacio considerables.

Las imágenes multiespectrales escogidas pertenecen al proyecto Landsat, ya que es una de las bases de datos más potentes de mediana resolución espacial (30m) y temporal (17 días aproximadamente), además de ser de libre acceso. Esto permitió descargar y procesar un grupo de 621 set de imágenes (esto no habría sido posible si se utilizaran imágenes satelitales de alta resolución debido el alto costo de cada imagen), las cuales incluyen las tres zonas de estudio analizadas en esta investigación. La resolución espacial es aceptable para el presente estudio, ya que las zonas escogidas tienen bajo rango mareal lo que permitió, en principio, no tener en cuenta el error de localización de la línea de costa debido a la marea, ya que sería menor al pixel.

Adicionalmente, con este trabajo se ha dejado una base de datos de 621 set de imágenes pre-procesadas, es decir con normalización radiométrica y corrección atmosférica (método DOS), con el correspondiente ahorro de tiempo, en caso de ser requeridas para más estudios en las zonas del delta del Guadalfeo, Adra y Ebro.

Por otra parte, también se utilizaron datos de alta resolución para comparar

los resultados obtenidos a partir de las imágenes Landsat. Éstos comprenden datos de campo de un sistema de posicionamiento global diferencial, imágenes aéreas y ortofotos de 0.5m/pixel. Teniendo así, datos de línea de costa identificada a partir de estos recursos.

Objetivo Específico 4

Revisar, analizar y comparar los distintos índices espectrales utilizados actualmente para la detección de la línea de costa.

En los últimos años se han venido desarrollando desde las más sencillas hasta las más sofisticadas técnicas de procesamiento dependiendo del tipo de dato. En esta investigación se ha escogido el índice espectral de agua para detectar la línea de costa debido a su sencillez, bajo costo y relativamente alta precisión. Aunque puedan existir múltiples índices espectrales, los más utilizados actualmente para la detección de cuerpos de agua son el NDWI, MNDWI, AWEI y la banda del NIR, con los cuales han sido comparados los datos obtenidos a partir de los índices propuestos en esta investigación.

Además de su sencillez y precisión, otra razón para la selección de índices espectrales radica en la automatización del proceso, lo cual es una ventaja en el momento de trabajar con muchas imágenes diferentes en una misma zona y poder, si se requiere, realizar un análisis multitemporal de forma sencilla y ágil. Esto resulta en una ventaja competitiva con respecto a otras técnicas de extracción de línea de costa que solo permiten procesar una imagen a la vez (como la identificación manual en imágenes de alta resolución con sistemas de información geográfica). A su vez, es un sistema sencillo que requiere poca pericia del usuario para aplicarlo a diferencia de otros sistemas del tipo clasificación supervisada, las cuales requieren de una serie de inputs que, si no se tienen claros, los resultados serán inútiles.

Sin embargo uno de los hándicap en la utilización de estos índices espectrales, es que su efectividad en la detección suelen depender del tipo de cobertura alrededor de la zona de estudio, debido al comportamiento espectral de

los mismos y de la adecuada selección del umbral para definir los píxeles correspondientes a agua/tierra. Por ello, se hace esencial profundizar en la definición de índices espectrales que puedan ser usados en un amplio rango de zonas de estudio, de forma más generalizada. Esto quedó manifestado en los resultados obtenidos en las tres zonas de estudio, en donde ninguno de los índices comúnmente utilizados, y que han sido evaluados en esta investigación, muestra un comportamiento estable de efectividad en las tres zonas.

Objetivo Específico 5

Proponer un nuevo índice a partir de un análisis empírico de imágenes multiespectrales en áreas micro-mareales que aporte una mejora en la detección de la línea de costa.

Con base en el planteamiento de los índices espectrales NDWI y MNDWI, y al análisis multiespectral de las zonas seleccionadas en esta investigación, se plantean dos índices espectral nuevos para la detección de la línea costera. De los índices propuestos, el que mejor resultado arrojó fue aquel (WI2) en el que se explota la alta reflectividad del agua en la banda del azul, en contraste con la casi nula en la banda SWIR2.

A diferencia de algunos estudios que utilizaron los datos primarios de las imágenes (DN) o solo realizaron la normalización radiométrica y/o conversión a unidades de reflectancia en el tope de la atmósfera. En esta investigación se calcularon los índices espectrales con una sencilla corrección atmosférica, ya que el brillo captado por los sensores no solo se debe a la reflectancia de la tierra sino también a las partícula en la atmósfera. Por otra parte, en la banda del azul es mayor la dispersión, es por eso que se hace necesaria esta corrección.

Además, por una parte el algoritmo de segmentación por umbralización con el método Otsu, permitió seguir con el procesamiento de forma automática, y por otra, gracias a su capacidad de encontrar un umbral óptimo que separe el objeto buscado del fondo (en este caso la línea de costa), se ha aprovechado de manera óptima el contraste obtenido después de aplicar el índice espectral propuesto (WI2) entre los píxeles de agua de aquellos que no lo son, en comparación

con el contraste obtenido en el resto de índices analizados en las tres zonas de estudio. Haciendo que este índice más apropiado para generalizar a distintas zonas de estudio.

Objetivo Específico 6

Diseñar una metodología que detecte de forma automática y fiable la línea de costa, y que además pueda ser aplicado a distintas zonas con el fin de establecer conclusiones generales a partir de la comparación y discusión de los resultados obtenidos.

Otro de los objetivos alcanzados fue la obtención de la línea de costa de forma automática utilizando una interfaz gráfica interactiva basada en la metodología propuesta, que permite utilizar múltiples imágenes de satélite. Aprovechando la disponibilidad de información de sensores distintos, lo que es de gran importancia ya que permite aprovechar casi toda la base de datos disponible, en caso de utilizar el proyecto Landsat.

La metodología está basada en la definición de un nuevo índice espectral que mejora notablemente la efectividad de detección de la línea de costa en comparación con los índices usualmente utilizados en la literatura. Como ya se ha mencionado, el índice propuesto WI2 obtuvo resultados destacables aprovechando la alta reflectividad de la banda del azul y la casi nula reflectividad en la banda SWIR2.

El índice espectral propuesto (WI2) demostró ser altamente efectivo al detectar la línea de costa en más del 96% del total de imágenes seleccionadas, mientras que los índices usualmente utilizados en la literatura no fueron capaz de detectar la línea de costa en más del 25% del total imágenes. Esto hace que el índice WI2 pueda aprovechar de forma más amplia la extensa base de datos del proyecto Landsat. Además, se destaca la capacidad de WI2 de obtener la línea de costa con una buena precisión geométrica de imágenes provenientes de los tres sensores ópticos principales en zonas de estudio micro-mareales y distintas coberturas tales como construcciones, agricultura, invernaderos, entre otros. Este destacable comportamiento se mantuvo en las tres zonas de estudio eva-

luadas, esto le provee una gran ventaja ya que puede ser utilizado en distintas zonas costeras a diferencia de otros índices que pueden estar restringidos a ciertas zonas.

En cuanto a la mejora de la precisión, se aplicó una interpolación bicúbica. Sin embargo, ésta no fue capaz de mejorar de forma considerable la precisión de la línea de costa extraída, por lo tanto, es aconsejable evaluar otras técnicas más complejas para el mejoramiento de la precisión sub-pixel.

8.2 | Futuras Líneas de Investigación

Dentro de las futuras líneas de investigación derivadas de esta tesis doctoral, se destacan las siguientes:

- Evaluar la influencia de diferentes condiciones en las zonas de estudio seleccionadas (estados de mar, efecto de las mareas, run-up, etc) en la precisión obtenida con la metodología propuesta.
- Uso de imágenes satelitales con características similares pero con una mayor resolución espacial (entre 10 y 30m) tales como las imágenes Sentinel de la Agencia Espacial Europea y evaluar su desempeño.
- Probar con otras metodologías para mejorar la precisión sub-pixel, tales como técnicas de super resolución basadas en la transformada de Fourier, transformada wavelet discreta (Desai and Bhadade, 2014), o la transformada compleja Daubechies (Kaawaase and Chi, 2013), las cuales son técnicas de mejoramiento de imagen de dominio de frecuencia.

GUI - Procesamiento de las Imágenes

En general, esta interface gráfica, permite seleccionar las imágenes corregidas que se deseen procesar, recortar la zona de estudio deseada, calcular los índices requeridos (incluyen los dos índices propuestos en la investigación), realizar el procesamiento de las imágenes seleccionadas, extraer las coordenadas de la línea de costa detectada y generar un archivo txt por cada línea de costa detectada.

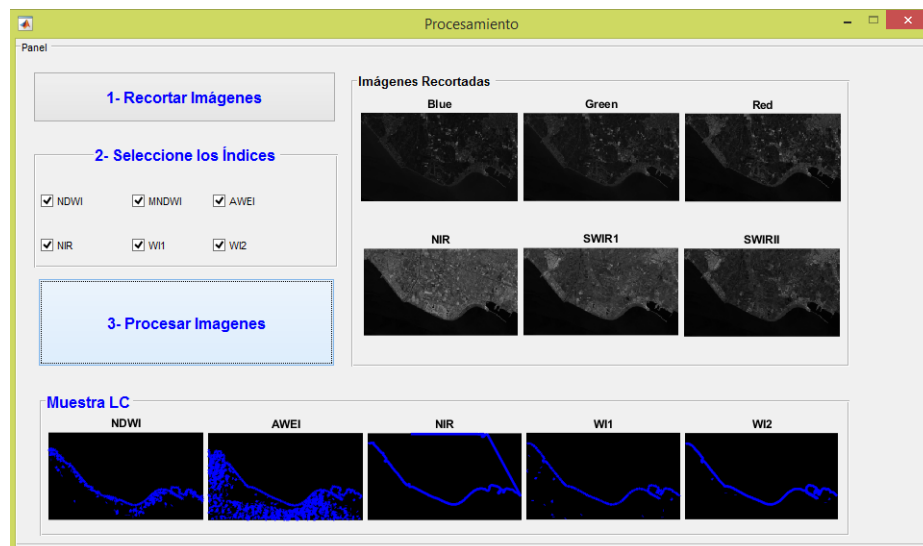


Figura A.1: Interfaz Gráfica para el Procesamiento de las Imágenes utilizando Índices Espectrales.

```

function varargout = Procesamiento(varargin)
% PROCESAMIENTO MATLAB code for Procesamiento.fig
%   PROCESAMIENTO, by itself, creates a new PROCESAMIENTO or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = PROCESAMIENTO returns the handle to a new PROCESAMIENTO or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   PROCESAMIENTO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in PROCESAMIENTO.M with the given input arguments.
%
%   PROCESAMIENTO('Property','Value',...) creates a new PROCESAMIENTO or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Procesamiento_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Procesamiento_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Procesamiento

% Last Modified by GUIDE v2.5 16-Feb-2020 20:44:12

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @Procesamiento_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn',  @Procesamiento_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn',  [] , ...
'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
[varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Procesamiento is made visible.
function Procesamiento_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.

```

Appendix A. GUI - Procesamiento de las Imágenes

```
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Procesamiento (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Procesamiento
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Procesamiento wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Procesamiento_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

clc
clear all

[archivos,ruta]=uigetfile('*..*','seleccione los archivos para recortar','multiselect','on');

if iscell(archivos)
jmax=size(archivos,2);
nombres=archivos;
else
jmax=1;
nombres=archivos;
end

cd(ruta);
mkdir ('Im_Recortadas');
cd('Im_Recortadas');
addpath('\Imagenes Landsat\Im_Recortadas','-end')
```

```

msgbox('Espere mensaje de - recorte finalizado -, por favor');

for j=1:jmax
a=importdata(fullfile(ruta,nombres{j}), ' ');
b.imagen=a;
b.nombre=nombres{j}(4:end);

if j==1
figure('Name','Recorte Imagen','NumberTitle','off');
[Xdata, Ydata, b.recorte, REctang]=imcrop(b.imagen);
close
subImage = b.recorte;
[A,R] = geotiffread(fullfile(ruta,nombres{j}));
xi=[REctang(1) REctang(1)+REctang(3)];
yi=[REctang(2) REctang(2)+REctang(4)];
[xworldlimits,yworldlimits] = intrinsicToWorld(R,xi,yi);
subR = R;
subR.RasterSize = size(subImage);
subR.XWorldLimits = sort(round(xworldlimits));
subR.YWorldLimits = sort(round(yworldlimits));
info = geotiffinfo(fullfile(ruta,nombres{j}));
filename = ['Crop_' b.nombre];
geotiffwrite(filename,subImage,subR, ...
'GeoKeyDirectoryTag',info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag)
else
[A2,R2] = geotiffread(fullfile(ruta,nombres{j}));
[xIntrinsic,yIntrinsic] = worldToIntrinsic(R2,xworldlimits,yworldlimits);
New_REctang=[min(xIntrinsic) min(yIntrinsic) max(xIntrinsic)-min(xIntrinsic) max(yIntrinsic)-min(yIntrinsic)];
subImage2=imcrop(A2,New_REctang);
subR2 = R2;
subR2.RasterSize = size(subImage2);
subR2.XWorldLimits = sort(round(xworldlimits));
subR2.YWorldLimits = sort(round(yworldlimits));
info2 = geotiffinfo(fullfile(ruta,nombres{j}));
filename2 = ['Crop_' b.nombre];
geotiffwrite(filename2,subImage2,subR2, ...
'GeoKeyDirectoryTag',info2.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag)

end

end

msgbox('Ya se realizó recorte');

function axes1_CreateFcn(varargin)

% --- Executes on button press in checkbox1.
function checkbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkbox1 (see GCBO)

```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox1
%get(hObject,'Value')
get(hObject,'Value')

% --- Executes on button press in checkbox2.
function checkbox2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to checkbox2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox2

% --- Executes on button press in checkbox3.
function checkbox3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to checkbox3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox3

% --- Executes on button press in checkbox4.
function checkbox4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to checkbox4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox4

% --- Executes on button press in checkbox5.
function checkbox5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to checkbox5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox5

% --- Executes on button press in checkbox6.
function checkbox6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to checkbox6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

Appendix A. GUI - Procesamiento de las Imágenes

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox6

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

[archivos,ruta]=uigetfile('*..*','Seleccione las imagenes Landsat','multiselect','on');

if iscell(archivos)
jmax=size(archivos,2);
nombres=archivos;
else
jmax=1;
nombres{1}=archivos;
end

%carga de la imagen, cada celda tendra la informacion de cada imagen en
%cada banda por separado

for j=1:jmax
[Image, R]=geotiffread(fullfile(ruta,nombres{j}));
Imagenes{j}.Im=Image;
Rinf{j}=R;
end

axes(handles.axes1)
imshow(Imagenes{1,1}.Im);
title('Blue');

axes(handles.axes2)
imshow(Imagenes{1,2}.Im);
title('Green');

axes(handles.axes3)
imshow(Imagenes{1,3}.Im);
title('Red');

axes(handles.axes4)
imshow(Imagenes{1,4}.Im);
title('NIR');

axes(handles.axes5)
imshow(Imagenes{1,5}.Im);
title('SWIRI');
```

```

axes(handles.axes6)
imshow(Imagenes{1,6}.Im);
title('SWIRII');

NDWI = get(handles.checkbox1,'Value');
MNDWI = get(handles.checkbox2,'Value');
AWEI = get(handles.checkbox3,'Value');
NIR = get(handles.checkbox4,'Value');
WI1 = get(handles.checkbox5,'Value');
WI2 = get(handles.checkbox6,'Value');

if NDWI
for j=1:jmax/6
Indexes{j}.NDWI=(Imagenes{((j*6)-4)}.Im-Imagenes{((j*6)-2)}.Im)./(Imagenes{((j*6)-4)}.Im+Imagenes{((j*6)-2)}.Im);
end

for j=1:length(Indexes)
levIndNDWI{j} = graythresh(Indexes{j}.NDWI);
Indexes{j}.OtsuInd= imbinarize(Indexes{j}.NDWI, levIndNDWI{j});
end
OneImageOtsu=true(size(Indexes{1,1}.OtsuInd));

for j=1:length(Indexes)
Indexes{j}.ChangeOtsu=OneImageOtsu-Indexes{j}.OtsuInd;
Indexes{j}.fill_OtsuInd=imfill(Indexes{j}.ChangeOtsu,'holes');
end
delta1=0; delta2=0;

for j=1:length(Indexes)
%Encontrar coordenadas de la linea de costa dibujada
[Img, LA] = bwboundaries(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
[fil2, col2]=size(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
%eliminar marco horizontal superior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical izquierdo
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical derecho
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==col2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco horizontal inferior
for n= 1: length(Img)

```



```

ind=find(Img{n}(:,1)==fil2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
Coordenadas.Canny=Img;
%paso de Cell array a matriz 2x1
matrix_c=cell2mat(Coordenadas.Canny);
Coordenadas.NDWI_Canny=matrix_c;
if isempty(matrix_c)
disp('No NDWI');
continue
else
%coordenadas geograficas
[Xcan_NDWI,Ycan_NDWI]=pix2map(Rinf{j*6},matrix_c(:,1),matrix_c(:,2));
Can_NDWI=[Xcan_NDWI+delta1,Ycan_NDWI+delta2];
filename = ['NDWI_' nombres{j*6}( strfind(nombres{j*6},'L'):end-7)];
[fil, col]=size(Coordenadas.NDWI_Canny);
exito=fGuardaMapaGIStxt(filename,fil,col,Can_NDWI);
IndexName{j}=filename;
end
end
axes(handles.axes8)
imshow(LA*0)
hold on
for k = 1:length(Img)
boundary = Img{k};
plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineWidth', 2)
end
title('NDWI');
end

if MNDWI
for j=1:jmax/6
Indexes{j}.MNDWI=(Imagenes{((j*6)-4)}.Im-Imagenes{((j*6)-1)}.Im)./(Imagenes{((j*6)-4)}.Im+Imagenes{((j*6)-1)}.Im);
end

for j=1:length(Indexes)
levIndMND{j} = graythresh(Indexes{j}.MNDWI);
Indexes{j}.OtsuInd= imbinarize(Indexes{j}.MNDWI, levIndMND{j});
end
OneImageOtsu=true(size(Indexes{1,1}.OtsuInd));
for j=1:length(Indexes)
Indexes{j}.ChangeOtsu=OneImageOtsu-Indexes{j}.OtsuInd;
Indexes{j}.fill_OtsuInd=imfill(Indexes{j}.ChangeOtsu,'holes');
end

delta1=0; delta2=0;

```

```

for j=1:length(Indexes)
%Encontrar coordenadas de la linea de costa dibujada
[Img, LA] = bwboundaries(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
[fil2, col2]=size(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
%eliminar marco horizontal superior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical izquierdo
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical derecho
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==col2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco horizontal inferior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==fil2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
Coordenadas.Canny=Img;
%paso de Cell array a matriz 2x1
matrix_c=cell2mat(Coordenadas.Canny);
Coordenadas.MNDWI_Canny=matrix_c;
if isempty(matrix_c)
disp('No MNDWI');
continue
else
%coordenadas geograficas
[Xcan_MNDWI,Ycan_MNDWI]=pix2map(Rinf{j*6},matrix_c(:,1),matrix_c(:,2));
Can_MNDWI=[Xcan_MNDWI+delta1,Ycan_MNDWI+delta2];
filename = ['MNDWI_' nombres{j*6}( strfind(nombres{j*6},'L'):end-7)];
[fil, col]=size(Coordenadas.MNDWI_Canny);
exito=fGuardaMapaGIStxt(filename,fil,col,Can_MNDWI);
IndexName{j}=filename;
end
end
axes(handles.axes9)
imshow(LA*0)
hold on
for k = 1:length(Img)
boundary = Img{k};
plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineWidth', 2)
end
title('MNDWI');

```

```

end

if AWEI
for j=1:jmax/6
Indexes{j}.AWEI=4*(Imagenes{((j*6)-4)}.Im - Imagenes{((j*6)-1)}.Im)-(0.25*Imagenes{((j*6)-2)}.Im + 2.75*Imagenes{j*6}.Im);
end

for j=1:length(Indexes)
levIndAWEI{j} = graythresh(Indexes{j}.AWEI);
Indexes{j}.OtsuInd= imbinarize(Indexes{j}.AWEI, levIndAWEI{j});
end
OneImageOtsu=true(size(Indexes{1,1}.OtsuInd));
for j=1:length(Indexes)
Indexes{j}.ChangeOtsu=OneImageOtsu-Indexes{j}.OtsuInd;
Indexes{j}.fill_otsuInd=imfill(Indexes{j}.ChangeOtsu,'holes');
end

delta1=0; delta2=0;

for j=1:length(Indexes)
%Encontrar coordenadas de la linea de costa dibujada
[Img, LA] = bwboundaries(Indexes{j}.fill_otsuInd);
[fil2, col2]=size(Indexes{j}.fill_otsuInd);
%eliminar marco horizontal superior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical izquierdo
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical derecho
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==col2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco horizontal inferior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==fil2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
Coordenadas.Canny=Img;
%paso de Cell array a matriz 2x1
matrix_c=cell2mat(Coordenadas.Canny);
Coordenadas.AWEI_Canny=matrix_c;
if isempty(matrix_c)
disp('No AWEI');

```

```

continue
else
%coordenadas geograficas
[Xcan_AWEI,Ycan_AWEI]=pix2map(Rinf{j*6},matrix_c(:,1),matrix_c(:,2));
Can_AWEI=[Xcan_AWEI+delta1,Ycan_AWEI+delta2];
filename = ['AWEI_' nombres{j*6}( strfind(nombres{j*6},'L'):end-7)];
[fil, col]=size(Coordenadas.AWEI_Canny);
exito=fGuardaMapaGIStxt(filename,fil,col,Can_AWEI);
IndexName{j}=filename;
end
end
axes(handles.axes9)
imshow(LA*0)
hold on
for k = 1:length(Img)
boundary = Img{k};
plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineWidth', 2)
end
title('AWEI');
end

if NIR
for j=1:jmax/6
Indexes{j}.NIR=Imagenes{((j*6)-2)}.Im;
end

for j=1:length(Indexes)
levIndNIR{j} = graythresh(Indexes{j}.NIR);
Indexes{j}.OtsuInd= imbinarize(Indexes{j}.NIR, levIndNIR{j}); %Binarizacion
end

for j=1:length(Indexes)
Indexes{j}.fill_OtsuInd=imfill(Indexes{j}.OtsuInd,'holes');
end

delta1=0; delta2=0;

for j=1:length(Indexes)
%Encontrar coordenadas de la linea de costa dibujada
[Img, LA] = bwboundaries(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
[fil2, col2]=size(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
%eliminar marco horizontal superior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical izquierdo
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==1);

```

```

Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical derecho
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==col2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco horizontal inferior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==fil2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
Coordenadas.Canny=Img;
%paso de Cell array a matriz 2x1
matrix_c=cell2mat(Coordenadas.Canny);
Coordenadas.NIR_Canny=matrix_c;
if isempty(matrix_c)
disp('No NIR');
continue
else
%coordenadas geograficas
[Xcan_NIR,Ycan_NIR]=pix2map(Rinf{j*6},matrix_c(:,1),matrix_c(:,2));
Can_NIR=[Xcan_NIR+delta1,Ycan_NIR+delta2];
filename = ['NIR_' nombres{j*6}( strfind(nombres{j*6},'L'):end-7)];
[fil, col]=size(Coordenadas.NIR_Canny);
exitof=GuardarMapaGIS.txt(filename,fil,col,Can_NIR);
IndexName{j}=filename;
end
end
axes(handles.axes10)
imshow(LA*0)
hold on
for k = 1:length(Img)
boundary = Img{k};
plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineWidth', 2)
end
title('NIR');
end

if WI1
for j=1:jmax/6
Indexes{j}.WI1=(Imagenes{((j*6)-4)}.Im-Imagenes{j*6}.Im)./(Imagenes{((j*6)-4)}.Im+Imagenes{j*6}.Im);
end

for j=1:length(Indexes)
levIndWI1{j} = graythresh(Indexes{j}.WI1);
Indexes{j}.OtsuInd= imbinarize(Indexes{j}.WI1, levIndWI1{j});
end
OneImageOtsu=true(size(Indexes{1,1}.OtsuInd));

```

```

for j=1:length(Indexes)
Indexes{j}.ChangeOtsu=OneImageOtsu-Indexes{j}.OtsuInd;
Indexes{j}.fill_OtsuInd=imfill(Indexes{j}.ChangeOtsu,'holes');
end

delta1=0; delta2=0;

for j=1:length(Indexes)
%Encontrar coordenadas de la linea de costa dibujada
[Img, LA] = bwboundaries(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
[fil2, col2]=size(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
%eliminar marco horizontal superior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical izquierdo
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical derecho
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==col2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco horizontal inferior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==fil2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
Coordenadas.Canny=Img;
%paso de Cell array a matriz 2x1
matrix_c=cell2mat(Coordenadas.Canny);
Coordenadas.WI1_Canny=matrix_c;
if isempty(matrix_c)
disp('No WI1');
continue
else
%coordenadas geograficas
[Xcan_WI1,Ycan_WI1]=pix2map(Rinf{j*6},matrix_c(:,1),matrix_c(:,2));
Can_WI1=[Xcan_WI1+delta1,Ycan_WI1+delta2];
filename = ['WI1_' nombres{j*6}( strfind(nombres{j*6},'L'):end-7)];
[fil, col]=size(Coordenadas.WI1_Canny);
exito=fGuardaMapaGIStxt(filename,fil,col,Can_WI1);
IndexName{j}=filename;
end
end
axes(handles.axes11)

```

```

imshow(LA*0)
hold on
for k = 1:length(Img)
boundary = Img{k};
plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineWidth', 2)
end
title('WI1');
end

if WI2
for j=1:jmax/6
Indexes{j}.WI2=(Imagenes{((j*6)-5)}.Im-Imagenes{j*6}.Im)./(Imagenes{((j*6)-5)}.Im+Imagenes{j*6}.Im);
end

for j=1:length(Indexes)
levIndWI2{j} = graythresh(Indexes{j}.WI2);
Indexes{j}.OtsuInd= imbinarize(Indexes{j}.WI2, levIndWI2{j});
end
OneImageOtsu=true(size(Indexes{1,1}.OtsuInd));
for j=1:length(Indexes)
Indexes{j}.ChangeOtsu=OneImageOtsu-Indexes{j}.OtsuInd;
Indexes{j}.fill_OtsuInd=imfill(Indexes{j}.ChangeOtsu,'holes');
end

delta1=0; delta2=0;

for j=1:length(Indexes)
%Encontrar coordenadas de la linea de costa dibujada
[Img, LA] = bwboundaries(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
[fil2, col2]=size(Indexes{j}.fill_OtsuInd);
%eliminar marco horizontal superior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical izquierdo
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==1);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco vertical derecho
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,2)==col2);
Img{n}(ind,:)=[];
end
%eliminar marco horizontal inferior
for n= 1: length(Img)
ind=find(Img{n}(:,1)==fil2);
Img{n}(ind,:)=[];

```

```
end
Coordenadas.Canny=Img;
%paso de Cell array a matriz 2x1
matrix_c=cell2mat(Coordenadas.Canny);
Coordenadas.WI2_Canny=matrix_c;
if isempty(matrix_c)
disp('No WI2');
continue
else
%coordenadas geograficas
[Xcan_WI2,Ycan_WI2]=pix2map(Rinf{j*6},matrix_c(:,1),matrix_c(:,2));
Can_WI2=[Xcan_WI2+delta1,Ycan_WI2+delta2];
filename = ['WI2_' nombres{j*6}( strfind(nombres{j*6},'L'):end-7)];
[fil, col]=size(Coordenadas.WI2_Canny);
exito=fGuardaMapaGIStxt(filename,fil,col,Can_WI2);
IndexName{j}=filename;
end
end
axes(handles.axes12)
imshow(LA*0)
hold on
for k = 1:length(Img)
boundary = Img{k};
plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineWidth', 2)
end
title('WI2');
end
```


Errores calculados en las líneas de costa extraídas

Tabla B.1: Comparación (Media \pm Desviación Estándar) entre las imágenes Landsat analizadas y los datos GPS / Ortofotos de alta resolución en el delta del río Guadalfeo.

Imágenes			Análisis Pixel							
Ortofoto	DGPS	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WI1	WI2	
Jul-10		18-Jul-10	TM	9,66 \pm 7,71	-2,10 \pm 7,82	1,90 \pm 6,22	-15,91 \pm 7,14	-15,10 \pm 23,43	-3,77 \pm 6,33	
May-13		23-May-13	OLI	1.133,74 \pm 139,39	239,41 \pm 233,42	452,41 \pm 409,55	-19,81 \pm 20,23	-5,91 \pm 6,64	-0,91 \pm 7,29	
	17-Oct-14	25-Oct-14	ETM	345,20 \pm 339,36	-6,46 \pm 6,67	1,20 \pm 8,49	-24,28 \pm 6,42	-10,46 \pm 6,39	-10,46 \pm 6,38	
	11-Dic-14	12-Dic-14	ETM	317,09 \pm 323,66	36,09 \pm 175,25	-5,24 \pm 7,12	-42,08 \pm 31,91	-10,90 \pm 6,33	-10,90 \pm 4,70	
	6-Feb-15	6-Feb-15	OLI	503,49 \pm 118,56	-0,51 \pm 6,48	47,49 \pm 119,40	-16,81 \pm 29,32	-7,51 \pm 5,65	-1,51 \pm 6,33	

Imágenes			Análisis Subpixel f = 2 (15m)							
Ortofoto	DGPS	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WI1	WI2	
Jul-10		18-Jul-10	TM	18,16 \pm 5,64	7,28 \pm 6,24	10,91 \pm 4,73	-6,47 \pm 5,43	-9,42 \pm 23,80	2,68 \pm 5,43	
May-13		23-May-13	OLI	-1,211,04 \pm 64,75	200,22 \pm 335,32	431,06 \pm 443,98	-6,96 \pm 16,83	0,34 \pm 6,54	8,04 \pm 6,20	
	17-Oct-14	25-Oct-14	ETM	283,39 \pm 350,27	1,05 \pm 4,93	10,20 \pm 5,10	-14,16 \pm 4,95	-3,27 \pm 5,15	-2,06 \pm 4,79	
	11-Dic-14	12-Dic-14	ETM	379,78 \pm 452,82	0,50 \pm 4,22	5,06 \pm 4,49	-30,51 \pm 26,44	-3,41 \pm 5,05	-2,40 \pm 4,54	
	6-Feb-15	6-Feb-15	OLI	506,05 \pm 121,10	8,15 \pm 4,52	25,77 \pm 5,48	-11,53 \pm 32,52	0,61 \pm 5,51	7,18 \pm 5,39	

Imágenes		Análisis Subpixel f = 3 (10m)									
Ortofoto	DGPS	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WII	W12		
Jul-10		18-Jul-10	TM	20,72±5,21	9,66±5,42	13,06±4,08	-4,28±4,99	-6,09 ±24,07	6,04±6,14		
May-13		23-May-13	OLI	-1217,31±65,95	206,33±352,55	481,96±477,09	-5,16±16,82	3,99±5,52	11,11±5,67		
	17-Oct-14	25-Oct-14	ETM	327,30±421,59	3,47±4,60	12,40±4,87	-11,53±4,73	-1,11±4,82	0,49±4,68		
	11-Dic-14	12-Dic-14	ETM	476,76±504,83	28,14±176,59	6,97±4,14	-27,17±24,33	-1,00±4,80	-0,05±4,34		
	6-Feb-15	6-Feb-15	OLI	500,81±121,73	10,49±4,14	27,72±5,05	-6,53±28,93	2,94±4,69	10,28±4,24		

Imágenes		Análisis Subpixel f = 5 (6m)									
Ortofoto	DGPS	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WII	W12		
Jul-10		18-Jul-10	TM	22,27±4,45	11,84±4,86	15,28±3,16	-2,16±4,35	-3,68±22,90	7,64±5,28		
May-13		23-May-13	OLI	-1219,69±66,32	217,51±358,79	484,74±474,76	-2,37±14,20	5,61±4,78	13,03±4,87		
	17-Oct-14	25-Oct-14	ETM	338,33±386,09	5,56±3,50	14,72±3,95	3,95±-9,62	4,03±1,05	2,56±3,77		
	11-Dic-14	12-Dic-14	ETM	470,70±478,00	19,90±101,45	9,14±3,11	-23,50±15,84	0,67±4,03	2,08±3,33		
	6-Feb-15	6-Feb-15	OLI	495,75±121,86	12,45±3,09	26,69±4,47	-5,38±27,61	4,85±4,08	12,49±3,31		

Imágenes		Análisis Subpixel f = 10 (3m)									
Ortofoto	DGPS	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WII	W12		
Jul-10		18-Jul-10	TM	23,91±4,45	13,40±4,74	16,74±3,13	-0,68±4,13	-1,59±22,61	8,99±5,21		
May-13		23-May-13	OLI	-1.217,23±66,49	225,48±364,63	486,15±480,75	-0,57±14,25	7,26±4,77	14,57±4,89		
	17-Oct-14	25-Oct-14	ETM	344,61±406,15	7,23±3,46	16,13±3,81	-7,98±3,87	2,62±3,78	4,22±3,60		
	11-Dic-14	12-Dic-14	ETM	459,47±498,02	14,23±96,36	10,57±3,02	-21,63±15,01	2,26±3,94	3,51±3,18		
	6-Feb-15	6-Feb-15	OLI	492,03±121,97	14,00±3,09	31,25±4,32	-3,24±27,30	6,30±4,02	13,87±3,27		

Tabla B.2: Comparación (Media \pm Desviación Estándar) entre las imágenes Landsat analizadas y los datos de alta resolución (ortofotos) en el delta del río Adra.

Imágenes			Análisis Pixel					
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WII	WI2
6-Jul-10	18-Jul-10	TM	799.54 \pm 723.70	-1.25 \pm 11.38	0.14 \pm 9.44	-25.94 \pm 19.06	-5.05 \pm 19.67	-2.27 \pm 10.77
13-Jun-13	23-May-13	OLI	439.90 \pm 180.58	742.22 \pm 328.16	660.42 \pm 284.78	-18.51 \pm 12.83	410.34 \pm 542.55	7.83 \pm 12.18
22-Jun-16	2-Jul-16	OLI	Sin Dato	12.70 \pm 9.14	42.45 \pm 141.41	-21.93 \pm 15.47	6.20 \pm 9.53	13.48 \pm 8.70

Imágenes			Análisis Subpixel f = 2 (15m)					
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WII	WI2
6-Jul-10	18-Jul-10	TM	657.11 \pm 737.32	7.83 \pm 9.94	9.73 \pm 9.06	-19.98 \pm 20.18	3.59 \pm 17.20	5.77 \pm 9.72
13-Jun-13	23-May-13	OLI	4237.16 \pm 183.99	732.37 \pm 337.91	553.86 \pm 311.10	-9.49 \pm 12.03	285.04 \pm 498.69	17.08 \pm 11.33
22-Jun-16	2-Jul-16	OLI	No Data	22.94 \pm 8.34	46.27 \pm 129.03	-12.14 \pm 13.80	14.33 \pm 7.36	23.60 \pm 7.27

Imágenes		Análisis Subpixel f = 3 (10m)							
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	WII	W12	W12	W12
6-Jul-10	18-Jul-10	TM	708.80±689.03	10.50±9.14	11.92±8.13	-17.29±18.93	2.40±63.61	8.69±9.05	
13-Jun-13	23-May-13	OLI	441.16±181.25	733.58±332.52	630.46±295.03	-7.42±11.33	301.19±489.797	19.75±10.65	
22-Jun-16	2-Jul-16	OLI	No Data	25.61±7.67	50.62±132.71	-9.62±12.67	16.59±6.72	26.06±6.29	

Imágenes		Análisis Subpixel f = 5 (6m)							
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WII	W12	W12
6-Jul-10	18-Jul-10	TM	721.29±707.75	12.54±8.89	13.90±8.10	-15.19±18.51	2.71±78.71	10.63±8.95	
13-Jun-13	23-May-13	OLI	436.92±181.72	732.94±335.01	628.33±296.39	-5.25±11.38	317.87±517.73	21.88±10.54	
22-Jun-16	2-Jul-16	OLI	No Data	27.59±7.49	51.98±124.90	-7.63±12.50	18.62±6.48	28.02±6.28	

Imágenes		Análisis Subpixel f = 10 (3m)							
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WII	W12	W12
6-Jul-10	18-Jul-10	TM	709.22±710.59	14.10±8.73	15.42±7.99	-13.55±18.16	3.87±82.25	12.12±8.81	
13-Jun-13	23-May-13	OLI	435.84±180.52	731.04±335.84	628.68±295.75	-3.72±11.113	321.18±523.72	23.42±10.47	
22-Jun-16	2-Jul-16	OLI	No Data	29.11±7.39	54.41±135.77	-6.07±12.27	20.14±6.30	29.65±6.16	

Tabla B.3: Comparación (Media \pm Desviación Estándar) entre las imágenes Landsat analizadas y los datos de alta resolución (ortofotos) en el delta del río Ebro.

Imágenes			Análisis Pixel						
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WI1	WI2	
21-Aug-07	13-Aug-07	TM	1,058.10 \pm 3,600.96	-7.92 \pm 10.09	-9.52 \pm 9.96	-35.52 \pm 15.28	-6.72 \pm 9.97	-4.32 \pm 10.49	
22-Jun-08	20-Jun-08	ETM	9,021.59 \pm 939.53	-9.73 \pm 10.98	-12.33 \pm 10.93	-31.90 \pm 11.80	-11.90 \pm 10.28	-8.86 \pm 11.30	
22-Jun-12	15-Jun-12	ETM	13,254.06 \pm 571.58	-5.94 \pm 12.38	-7.87 \pm 10.53	-29.41 \pm 13.16	-10.18 \pm 12.22	-7.87 \pm 11.72	

Imágenes			Análisis Subpixel f = 2 (15m)						
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WI1	WI2	
21-Aug-07	13-Aug-07	TM	262.20 \pm 1,448.87	1.90 \pm 5.72	0.60 \pm 5.68	-30.80 \pm 12.18	2.20 \pm 6.09	5.30 \pm 5.67	
22-Jun-08	20-Jun-08	ETM	8,715.20 \pm 935.18	-0.23 \pm 6.02	-2.93 \pm 6.27	-22.46 \pm 7.12	-2.39 \pm 6.11	-0.88 \pm 6.08	
22-Jun-12	15-Jun-12	ETM	13,069.44 \pm 761.61	1.83 \pm 9.04	0.88 \pm 7.18	-21.95 \pm 9.53	-1.63 \pm 8.18	1.69 \pm 8.88	

Imágenes		Análisis Subpixel f = 3 (10m)							
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WI1	WI2	
21-Aug-07	13-Aug-07	TM	540.43±2,601.53	4.07±5.97	3.09±5.89	-28.56±12.74	4.61±6.15	7.51±6.08	
22-Jun-08	20-Jun-08	ETM	8,383.51±1,440.30	2.44±6.75	0.18±6.26	-20.30±7.53	-0.16±6.08	1.77±6.22	
22-Jun-12	15-Jun-12	ETM	13,030.77±775.17	4.14±9.16	3.26±7.14	-19.57±9.19	0.60±8.91	3.97±9.24	

Imágenes		Análisis Subpixel f = 5 (6m)							
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WI1	WI2	
21-Aug-07	13-Aug-07	TM	575.40±2,674.08	5.93±5.67	5.02±5.65	-26.30±12.70	6.75±5.80	9.83±5.49	
22-Jun-08	20-Jun-08	ETM	7,889.82±1,650.48	4.26±6.49	1.89±5.85	-18.07±7.15	2.09±6.03	3.65±6.01	
22-Jun-12	15-Jun-12	ETM	12,898.96±811.33	6.28±9.03	5.37±7.02	-17.37±8.84	2.85±8.51	5.81±8.90	

Imágenes		Análisis Subpixel f = 3 (10m)							
Ortofoto	Landsat	Sensor	AWEI	MNDWI	NDWI	NIR	WI1	WI2	
21-Aug-07	13-Aug-07	TM	612.15±2,622.36	7.48±5.38	6.54±5.41	-24.74±12.04	8.18±5.57	11.30±5.40	
22-Jun-08	20-Jun-08	ETM	7,293.65±1,494.71	5.87±6.24	3.44±5.64	-16.48±6.82	3.58±5.68	5.20±5.74	
22-Jun-12	15-Jun-12	ETM	12,783.87±855.88	7.71±8.93	6.86±6.85	-15.92±8.75	4.37±8.37	7.24±8.81	

Referencias

- K.R. Agrawal and S.R. Guadadhe. Remote sensing. *Journal of Intelligence Systems*, 4(1):55–60, 2014. doi: 10.3390/rs6054546. URL <http://oro.open.ac.uk/33474/>.
- F J. Aguilar, I. Fernandez-Luque, M. A. Aguilar, A.M. García-Lorca, and A. R. Viciano. The integration of multi-source remote sensing data for the modelling of shoreline change rates in a mediterranean coastal sector. *International Journal of Remote Sensing*, 40(3):1148–1174, 2019. doi: 10.1080/01431161.2018.1524175.
- S. Al-mansoori and F. Al-marzouqi. Coastline Extraction using Satellite Imagery and Image Processing Techniques. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 6(4):1245–1251, 2016.
- S. Alhirmizy. A Comparative Study between Landsat-8 OLI and Landsat-7 ETM + , for sensor signal-to-noise performance , Spectral Distortion , and spectral signature matching : A Study in the IRAQ Landcape. In *SPIE international symposium on Remote Sensing*, pages 1–18, 2015.
- J. Almonacid-Caballer, J. E. Pardo-Pascual, and L. A. Ruiz. Detección automática de la línea de costa con precisión subpíxel en imágenes landsat 7 con error de bandeado. *XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, (figura 1):4, 2013.
- D. Alvarado-Aguilar, J. A. Jiménez, and R. J. Nicholls. Flood hazard and damage assessment in the Ebro Delta (NW Mediterranean) to relative sea level rise. *Natural Hazards*, 62(3):1301–1321, 2012. ISSN 0921030X. doi: 10.1007/s11069-012-0149-x.
- N. E. Amrani-paaza, M. Larocque, Ol. Banton, E. Des, and A. Almería. Simulation of groundwater contamination in the Adra river delta and eutrophication of two lagoons (Almeria, Spain). *Revue des Sciences de l'Eau*, 29(January):15–25, 2007. doi: 10.7202/014904ar.
- L. Andersson, J. Wilk, M. C. Todd, D. A. Hughes, A. Earle, D. Kniveton, R. Layberry, and H.G. Savenije. Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River. *Journal of Hydrology*, 331:43–47, 2006. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.04.039.
- S Anjna and G Rajandeep. Review of image segmentation technique. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 175(4):246–247, 2016. doi: 10.1016/j.jpeds.2016.05.053.
- E. C. Barrett and L. Curtis. *Introduction to Environmental Remote Sensing*. Routledge, 4th edition, 1992. ISBN 0748740066.

- G. Basterretxea, A. Orfila, A. Jordi, J.J. Fornós, and J. Tintoré. Evaluation of a small volume renourishment strategy on a narrow Mediterranean beach. *Geomorphology*, 88(1-2):139–151, jul 2007. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.019.
- B. Bayram, U. Acar, D. Seker, and A. Ari. A Novel Algorithm for Coastline Fitting through a Case Study over the Bosphorus. *Journal of Coastal Research*, 244(4):983–991, 2008. doi: 10.2112/07-0825.1.
- R. Bergillos, C. Rodriguez-Delgado, A. Lopez-Ruiz, A. Millares, M. Ortega-Sanchez, and M. Á. Losada. Recent Human-Induced Coastal Changes in the Guadalfeo River Deltaic System (Souther Spain). In *IAHR World Congress*, pages 1–10, 2015.
- R. Bergillos, A. Lopez-Ruiz, M. Ortega-Sánchez, G. Masselink, and M. A. Losada. Implications of delta retreat on wave propagation and longshore sediment transport - Guadalfeo case study (southern Spain). *Marine Geology*, 382:1–16, 2016a. ISSN 00253227. doi: 10.1016/j.margeo.2016.09.011. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.09.011>.
- R. Bergillos, C. Rodríguez-Delgado, and M. Ortega-Sánchez. Advances in management tools for modeling artificial nourishments in mixed beaches. *Journal of Marine Systems*, 172(August):1–13, 2017. ISSN 09247963. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.02.009.
- R.J. Bergillos, C. Rodriguez-Delgado, A. Millares, M. Ortega-Sánchez, and Miguel a Losada. Impact of river regulation on a Mediterranean delta: Assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research*, 52:1–20, 2016b. ISSN 00431397. doi: 10.1002/2014WR015716.
- E. H. Boak and I. L. Turner. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(214):688–703, 2005. ISSN 0749-0208. doi: 10.2112/03-0071.1.
- M. Brignone, C. F. Schiaffino, F. I. Isla, and M. Ferrari. A system for beach video-monitoring: Beachkeeper plus. *Computers and Geosciences*, 49:53–61, 2012. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2012.06.008.
- I. Caballero, G. Navarro, and J. Ruiz. Multiplatform assessment of turbidity plumes during dredging operations in a major estuarine system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68:31–41, 2018. ISSN 1872826X. doi: 10.1016/j.jag.2018.01.014.
- J. B. Campbell. *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press, London, 4th edition, 2008.
- J. B. Campbell and R. H. Wynne. *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press, 5th edition, 2011. ISBN 160918176X.
- J. C. Campos, N. Sillero, and J. C. Brito. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara-Sahel transition zone. *Journal of Hydrology*, 464-465:438–446, 2012. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.042.
- X. Castellort, J. Ruiz-Bellet, J. Balasch, M. Barriendos, D. Pino, J. Peña, and J. Tuset. The extreme floods in the Ebro River basin since 1600 CE. *Science of The Total Environment*, 646:645–660, 2018. ISSN 00489697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.325. URL <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.325>.
- P. S. Chavez. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3):459–479, 1988. ISSN 00344257. doi: 10.1016/0034-4257(88)90019-3.
- P. S. Chavez. *Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved*, 1996. ISSN 0099-1112.
- E. Chuvieco. *Fundamentos de Teledeteccion Espacial*. Rialp S.A., 2th edition, 1995. ISBN 8432126802.
- E. Chuvieco. *Teledeteccion Ambiental*. Grupo Planeta, 2008. ISBN 8434480778, 9788434480773.

- E Chuvieco. *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. CRC Press, 2016.
- R. N. Colwell. Uses and limitations of multispectral remote sensing.pdf. In *Fourth Symposium on Remote Sensing.*, pages 71–100, University of Michigan, 1966.
- L. Congedo. Semi Automatic Classification Plugin Semi Automatic Classification Plugin Documentation. *Scp*, (September 03, 2016), 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1.
- A. P. Cracknell and L. Hayes. *Introduction to Remote Sensing*. Taylor and Francis Group, London, 2th edition, 2007.
- E. P. Crist. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17 (3):301–306, jun 1985. ISSN 00344257. doi: 10.1016/0034-4257(85)90102-6.
- C. Da Lio and L. Tosi. Vulnerability to relative sea-level rise in the Po river delta (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 228(106379), 2019. ISSN 02727714. doi: 10.1016/j.ecss.2019.106379.
- Junta de Andalucía. Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Ortofotografías de Andalucía. Ortofotografía de Andalucía en Color 0,5 metros/pixel 2008-2009, 2009. URL <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/prodCartografia/ortofotografias/orto09.htm>.
- L. De Keukelaere, S. Sterckx, S. Adriaensen, E. Knaeps, I. Reusen, C. Giardino, M. Bresciani, P. Hunter, C. Neil, D. Van der Zande, and D. Vaiciute. Atmospheric correction of Landsat-8/OLI and Sentinel-2/MSI data using iCOR algorithm: validation for coastal and inland waters. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1):525–542, 2018. ISSN 22797254. doi: 10.1080/22797254.2018.1457937. URL <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1457937>.
- I. De Vicente, L. Serrano, V. Amores, V. Clavero, and L. Cruz-Pizarro. Sediment phosphate fractionation and interstitial water phosphate concentration in two coastal lagoons (Albuferas de Adra, SE Spain). *Hydrobiologia*, 492(1-3):95–105, 2003. ISSN <null>. doi: 10.1023/A. URL papers2://publication/uuid/BFDC7D14-EB5B-46FF-A6B7-964CD98C7413.
- S. de Vries, D. F. Hill, M. a. de Schipper, and M. J F Stive. Remote sensing of surf zone waves using stereo imaging. *Coastal Engineering*, 58:239–250, 2011. ISSN 03783839. doi: 10.1016/j.coastaleng.2010.10.004.
- L. Del Río, F. J. Gracia, and J. Benavente. Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196:252–266, aug 2013. ISSN 0169555X. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.07.027. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12003765>.
- S. Dellepiane, R. De Laurentiis, and F. Giordano. Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision. *Pattern Recognition Letters*, 25(13):1461–1470, oct 2004. ISSN 01678655. doi: 10.1016/j.patrec.2004.05.022. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865504001291>.
- H. Demirel and G. Anbarjafari. IMAGE resolution enhancement by using discrete and stationary wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 20(5):1458–1460, 2011. ISSN 10577149. doi: 10.1109/TIP.2010.2087767.
- S. A. Desai and U. S. Bhadade. Image Resolution Enhancement Based on DWT & SWT. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3(10):344–348, 2014.
- R. Dolan, B.P. Hayden, P. May, and S. May. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48:22–29, 1980.
- H. S. Duzgun and N. Demirel. *Remote Sensing of the Mine Environment*. CRC Press, 2011. ISBN 0415878799.

- D. A. Edmonds, R. L. Caldwell, S.E. Baumgardner, C. Paola, S. Roy, A. Nelson, and J. H. Nienhuis. Analysis of human habitation on river deltas. *EGU General Assembly*, 19:10832, 2017.
- H. M. El-Asmar and K. White. Changes in coastal sediment transport processes due to construction of New Damietta Harbour, Nile Delta, Egypt. *Coastal Engineering*, 46(2):127–138, jul 2002. ISSN 03783839. doi: 10.1016/S0378-3839(02)00068-6. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383902000686>.
- N. Elko, F. Feddersen, D. Foster, C. Hapke, J. Mcninch, R. Mulligan, H. T. Ozkan-haller, N. Plant, and B. Raubenheimer. the future of nearshore processes research Edited by. Technical Report December, The Nearshore processes community, 2014.
- A. J. Elmore, J. F. Mustard, S. J. Manning, and D. B. Lobell. Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments. *Remote Sensing of Environment*, 73(1):87–102, 2000. ISSN 00344257. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00100-0.
- W. Emery and A. Camps. Basic Electromagnetic Concepts and Applications to Optical Sensors. In *Introduction to Satellite Remote Sensing*, pages 43–83. Elsevier, jan 2017. ISBN 978-0-12-809254-5. doi: 10.1016/B978-0-12-809254-5.00002-6. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128092545000026>.
- S. Fatorić and L. Chelleri. Vulnerability to the effects of climate change and adaptation: The case of the Spanish Ebro Delta. *Ocean and Coastal Management*, 60:1–10, 2012. ISSN 09645691. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2011.12.015.
- A. Felix, A. Baquerizo, J. M. Santiago, and M. A. Losada. Coastal zone management with stochastic multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Management*, 112:252–266, 2012. ISSN 03014797. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.05.033. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.033>.
- G. L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, and S. R. Proud. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140:23–35, 2014. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.029. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>.
- W.A Fischer, W.R Hemphill, and A. Kover. Progress in remote sensing (1972 to 1976). *Photogrammetria*, 32(2):33–72, oct 1976. ISSN 00318663. doi: 10.1016/0031-8663(76)90013-2. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031866376900132>.
- A. Fisher, N. Flood, and T. Danaher. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175:167–182, 2016. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2015.12.055. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>.
- N. Flood. Continuity of reflectance data between landsat-7 ETM+ and landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the australian landscape. *Remote Sensing*, 6(9):7952–7970, 2014. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs6097952.
- R.M. Fuller, G.B. Groom, and A.R. Jones. The Land Cover Map of Great Britain: An Automated Classification of Landsat Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 60(5):553–562, 1994. ISSN 00991112. doi: 10.1016/j.jmarsys.2011.11.027. URL <http://nora.nerc.ac.uk/4729/>.
- S. Gandía and J. Melía. *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos Renovables: Agricultura*. Universidad de Valencia, Valencia, 1991.
- B. C. Gao. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3):257–266, 1996. ISSN 00344257. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- R Gens. Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 31(7): 1819–1836, 2010. doi: 10.1080/01431160902926673.

- E. Ghanavati, P. Z. Firouzabadi, a. a. Jangi, and S. Khosravi. Monitoring geomorphologic changes using Landsat TM and ETM+ data in the Hendijan River delta, southwest Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4):945–959, 2008. ISSN 0143-1161. doi: 10.1080/01431160701294679.
- M. K. Ghosh, L. Kumar, and C. Roy. Monitoring the coastline change of Hatiya Island in Bangladesh using remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, (101):137–144, 2015. ISSN 09242716. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.12.009.
- P. Gibson. *Introductory Remote Sensing: Principles and Concepts*. Taylor and Francis Group, 2000.
- S. Gilmore and A. Saleem. Effectiveness of DOS (Dark-Object Subtraction) method and water index techniques to map wetlands in a rapidly urbanising megacity with Landsat 8 data. In *Research Locate 15*, number March, pages 10–12, 2015.
- S. Graham. Remote Sensing, 1999. URL <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/remote.php>.
- R. K. Gupta, T. S. Prasad, and D. Vijayan. Relationship between LAI and NDVI for IRS LISS and LANDSAT TM bands. *Advances in Space Research*, 26(7):1047–1050, 2000. ISSN 02731177. doi: 10.1016/S0273-1177(99)01115-1.
- R.P. Gupta. *Remote Sensing Geology*. Springer, 2th edition, 2003.
- G. Hagenaaers, S. de Vries, A. P. Luijendijk, W. P. de Boer, and J.H.M. Reniers. On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: A case study of the sand motor mega-scale nourishment. *Coastal Engineering*, 133(June 2017):113–125, 2018. ISSN 03783839. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.12.011. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383917302399>.
- S. Hantson and E. Chuvieco. Evaluation of different topographic correction methods for landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13:691–700, 2011. ISSN 15698432. doi: 10.1016/j.jag.2011.05.001.
- S. Hantson, E. Chuvieco, X. Pons, C. Domingo, C. Cea, G. Moré, J. Cristobal, J. J. Peces, and J. a. Tejeiro. Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36:51–61, 2011.
- H. Harahsheh. Remote sensing applications for coastal and marine resources management. In M. Al-Azab, W. El-Shorbagy, and S. Al-Ghais, editors, *Oil Pollution and its Environmental Impact in the Arabian Gulf Region*, chapter 4, pages 49–61. Elsevier B.V., 2005.
- K. T. Holland and R. a. Holman. Field observations of beach cusps and swash motions. *Marine Geology*, 134:77–93, 1996. ISSN 00253227. doi: 10.1016/0025-3227(96)00025-4.
- R. Holman, A. Sallenger, T. Lippmann, and J. Haines. The Application of Video Image Processing to the Study of Nearshore Processes. *Oceanography*, 6(3):78–85, 1993. ISSN 10428275. doi: 10.5670/oceanog.1993.02.
- C. Huang, Y. Chen, S. Zhang, and J. Wu. Detecting, Extracting, and Monitoring Surface Water From Space Using Optical Sensors: A Review. *Reviews of Geophysics*, 56(2):333–360, 2018. ISSN 19449208. doi: 10.1029/2018RG000598.
- L. Huthmacher and F. Muller-Karger. Project Oceanography - Ocean Color. Technical report, University of South Florida, 1999.
- J. R. Irons, J. L. Dwyer, and J. A. Barsi. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*, 122:11–21, 2012. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.026.

- A. Jabaloy-Sánchez, F. J. Lobo, A. Azor, P. Bárcenas, L. M. Fernández-Salas, V. D. del Río, and J. V. Pérez-Peña. Human-driven coastline changes in the Adra River deltaic system, southeast Spain. *Geomorphology*, 119(1-2):9–22, 2010. ISSN 0169555X. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.004>.
- A. Jabaloy-Sanchez, F. J. Lobo, A. Azor, W. Martin-Rosales, J. V. Perez-Pena, P. Barcnas, J. Macias, L. M. Fernandez-Salas, and M. Vazquez-Valchez. Six thousand years of coastline evolution in the Guadalfeo deltaic system (southern Iberian Peninsula). *Geomorphology*, 206:374–391, 2014. ISSN 0169555X. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.08.037. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.037>.
- L. Ji, L. Zhang, and B. Wylie. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11):1307–1317, 2009. ISSN 00991112. doi: 10.14358/PERS.75.11.1307.
- H. Jiang, M. Feng, Y. Zhu, N. Lu, Jianxi Huang, and Tong Xiao. An automated method for extracting rivers and lakes from Landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(6):5067–5089, 2014. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs6065067.
- J. A. Jiménez and A. Sánchez-Arcilla. Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Marine Geology*, 114(1-2): 105–118, 1993. ISSN 00253227. doi: 10.1016/0025-3227(93)90042-T.
- J. A. Jiménez, A. Sánchez-Arcilla, H. I. Valdemoro, V. Gracia, and F. Nieto. Processes reshaping the Ebro delta. *Marine Geology*, 144(1-3):59–79, 1997. ISSN 00253227. doi: 10.1016/S0025-3227(97)00076-5.
- J.A. Jimenez, H. Valdemoro I., E. Bosom, A. Sanchez-Arcilla, and R. Nicholls. Impacts of sea-level rise-induced erosion on the Catalan coast. *Regional Environmental Change*, 2016.
- J. Jiménez-Sánchez, W. Martín-Rosales, F. Fernández-Chacón, and J.C. Rubio-Campos. Variabilidad temporal de las precipitaciones en la cuenca del río Guadalfeo (provincia de Granada). *Agua y Cultura, Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 2:159–168, 2008.
- Junta de Andalucía. Valores Ambientales de la Zona Especial de Conservación Río Adra. Technical report, Junta de Andalucía, 2015.
- K. S. Kaawaase and F. Chi. Image superresolution based on interpolation of complex Daubechies wavelet coefficients. *Information Technology Journal*, 12(5):951–958, 2013. ISSN 18125638. doi: 10.3923/ij.2013.951.958.
- D. J. Keith. Coastal and Estuarine Waters: Optical Sensors and Remote Sensing. *Encyclopedia of Natural Resources: Water*, (August 2014):656–661, 2016. doi: 10.1081/E-ENRW-120051663. URL <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1081/E-ENRW-120051663>.
- S. Khorram, C. F. Wiele, F. H. Koch, S. A. C. Nelson, and M. D. Potss. *Principles of Applied Remote Sensing*. 2016. ISBN 978-3-319-22559-3. doi: 10.1007/978-3-319-22560-9.
- V. Klemas. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 27: 2–17, 2011. ISSN 0749-0208. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00103.1.
- R.F. Kokaly, R.N. Clark, G.A. Swayze, K.E. Livo, T.M. Hoefen, N.C. Pearson, R.A. Wise, W.M. Benzel, H.A. Lowers, R.L. Driscoll, and A.J. Klein. USGS Spectral Library, 2017. URL <https://crustal.usgs.gov/speclab/QueryAll07a.php>.
- G. Konecny. *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and geografic information System*. Taylor and Francis Group, London, 2th edition, 2014.
- H. E. Krogstad and S. F. Barstow. Satellite wave measurements for coastal engineering applications. *Coastal Eng.*, 37 (0378):283–307, 1999.

- T. Kuleli, A. Guneroglu, F. Karsli, and M. Dihkan. Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38(10):1141–1149, 2011. ISSN 00298018. doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.05.006.
- P.D. Kunte. Potential Usage of Remote Sensing data in Studying the behaviour of Shore Drift Along Kerala Coast, India. *Estuarine, Coastal and Shelf science*, 38:613–624, 1994. ISSN 02727714. doi: 10.1006/ecss.1994.1042. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771484710420>.
- J. P. Lacaux, Y. M. Tourre, C. Vignolles, J. A. Ndione, and M. Lafaye. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1):66–74, jan 2007. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2006.07.012. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425706002811>.
- V. Lafon, D. De Melo Apoluceno, H. Dupuis, D. Michel, H. Howa, and J.M. Froidefond. Morphodynamics of nearshore rhythmic sandbars in a mixed-energy environment (SW France): I. Mapping beach changes using visible satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(2):289–299, oct 2004. ISSN 02727714. doi: 10.1016/j.ecss.2004.05.006.
- C. Lavoie, J. A. Jiménez, M. Canals, G. Lastras, B. De Mol, D. Amblas, C. Liqueste, M. De Batist, and J. E. Hughes Clarke. Influence on present-day coastal dynamics and evolution of a relict subaqueous delta lobe: Sol de riu lobe, ebro delta. *Continental Shelf Research*, 74:94–104, 2014. ISSN 02784343. doi: 10.1016/j.csr.2013.11.021.
- B. Li, C. Ti, Y. Zhao, and X. Yan. Estimating soil moisture with Landsat data and its application in extracting the spatial distribution of winter flooded paddies. *Remote Sensing*, 8(1), 2016. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs8010038.
- P. Li, L. Jiang, and Z. Feng. Cross-comparison of vegetation indices derived from landsat-7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) and landsat-8 operational land imager (OLI) sensors. *Remote Sensing*, 6(1):310–329, 2013. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs6010310.
- W. Li and P. Gong. Continuous monitoring of coastline dynamics in western Florida with a 30-year time series of Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 179:196–209, 2016. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2016.03.031.
- T. Lillesand. Satellite remote sensing: Its evolution and synergism with GIS technology. *Government Information Quarterly*, 7(3):307–327, 1990. ISSN 0740624X. doi: 10.1016/0740-624X(90)90027-L.
- T. Lillesand, R. Kiefer, and J. Chipman. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, 6th edition, 2007.
- Z. Lintz and D.S. Simonett. *Remote Sensing of Environment*, 1976.
- T. C. Lippmann and R. a. Holman. Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94:995, 1989. ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/JC094iC01p00995.
- C. Liqueste, P. Arnau, M. Canals, and S. Colas. Mediterranean river systems of Andalusia, southern Spain, and associated deltas: A source to sink approach. *Marine Geology*, 222-223(1-4):471–495, 2005. ISSN 00253227. doi: 10.1016/j.margeo.2005.06.033.
- Y. Liu, X. Wang, F. Ling, and C. Wang. Analysis of coastline extraction from Landsat-8 OLI imagery. *Water (Switzerland)*, 9(11):1–26, 2017. ISSN 20734441. doi: 10.3390/w9110816.
- P. Maglione, C. Parente, and A. Vallario. Coastline extraction using high resolution WorldView-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1):685–699, 2014. ISSN 22797254. doi: 10.5721/EuJRS20144739.
- M. Mahapatra, R. Ratheesh, and A. S. Rajawat. Shoreline Change Analysis along the Coast of South Gujarat, India, Using Digital Shoreline Analysis System. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42(December):869–876, 2014. ISSN 0255660X. doi: 10.1007/s12524-013-0334-8.

- D. A. Maldonado. El Delta del Guadalfeo. In *XXVII Semana de estudios del mar*, pages 188–212, 2008.
- R. Mani, M. Ankita, S. Amrita, and P. Vethamony. Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12):3291–3311, 2013. ISSN 15618633. doi: 10.5194/nhess-13-3291-2013.
- E. Maras, M. Caniberk, and H. Maras. Automatic Coastline Detection Using Image Enhancement and Segmentation Algorithms. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(6):2519–2525, 2016. ISSN 1230-1485. doi: 10.15244/pjoes/64160.
- D.C. Mason and I.J. Davenport. Accurate and efficient determination of the shoreline in ERS-1 SAR images. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 34(5):1243–1253, 1996.
- G. Masselink, P. Russell, G. Coco, and D. Huntley. Test of edge wave forcing during formation of rhythmic beach morphology. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 109(April):1–10, 2004. ISSN 01480227. doi: 10.1029/2004JC002339.
- S. K. McFeeters. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1996.
- I. Mendes, F. J. Lobo, L. M. Fernández-Salas, N. López-González, P. Bárcenas, J. Schönfeld, and Ferreira. Multi-proxy evidence of rainfall variability recorded in subaqueous deltaic deposits off the Adra River, southeast Iberian Peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167:300–312, 2015. ISSN 02727714. doi: 10.1016/j.ecss.2015.08.005.
- M. V. Mikhailova. Transformation of the Ebro River Delta under the Impact of Intense Human-Induced Reduction of Sediment Runoff. *Water Resources*, 30(4):370–378, 2003. ISSN 00978078. doi: 10.1023/A:1024963911893.
- A. Millares, M. J. Polo, A. Moñino, J. Herrero, and M. A. Losada. Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. *Geomorphology*, 206:330–342, 2014. ISSN 0169555X. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.09.038.
- S. Minu and S. Amba. A Comparative Study of Image Change Detection Algorithms in MATLAB. *Aquatic Procedia*, 4 (Icwrcoe):1366–1373, 2015. ISSN 2214-241X. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.177.
- M. Modava, G. Akbarizadeh, and M. Soroosh. Integration of Spectral Histogram and Level Set for Coastline Detection in SAR Images. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55(2):810–819, 2019. ISSN 15579603. doi: 10.1109/TAES.2018.2865120.
- M. S. Moran, R. D. Jackson, P. N. Slater, and P. M. Teillet. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41:169–184, 1992. ISSN 00344257. doi: 10.1016/0034-4257(92)90076-V.
- NASA. Landsat 7 Science Data Users Handbook. Technical report, Landsat Project Science Office, 2004. URL <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7-data-users-handbook>.
- M. Nazeer, J. E. Nichol, and Y. K. Yung. Evaluation of atmospheric correction models and Landsat surface reflectance product in an urban coastal environment. *International Journal of Remote Sensing*, 35(16):6271 – 6291, 2014. ISSN 0143-1161. doi: 10.1080/01431161.2014.951742. URL <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2014.951742>.
- A. Niedermeier, E. Romaneßen, and S. Lenher. Detection of coastline in SAR images using wavelet methods. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 38(5):2270–2281, 2000.
- E. G. Njoku. Encyclopedia of Remote Sensing, 2013.

- M. Ortega-Sánchez, F. J. Lobo, A. López-Ruiz, M. A. Losada, and L. M. Fernández-Salas. The influence of shelf-indenting canyons and infralittoral prograding wedges on coastal morphology: The Carchuna system in Southern Spain. *Marine Geology*, 347:107–122, 2014. ISSN 00253227. doi: 10.1016/j.margeo.2013.11.006. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.006>.
- N. Otsu. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*, 9(1):62–66, 1979.
- Y. Ouma and R. Tateishi. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: An empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(15):3153–3181, 2006. ISSN 13665901. doi: 10.1080/01431160500309934.
- A. Pacheco, J. Horta, C. Loureiro, and Ó. Ferreira. Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 159:102–116, 2015. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2014.12.004.
- A. Palanques and J. Guillen. Coastal changes in the Ebro delta: Natural and human factors. *Journal of Coastal Conservation*, 4(1):17–26, 1998. ISSN 14000350.
- J. Pardo-Pascual, E. Sánchez-García, J. Almonacid-Caballer, J. Palomar-Vázquez, E. Priego de los Santos, Al. Fernández-Sarría, and Á. Balaguer-Beser. Assessing the Accuracy of Automatically Extracted Shorelines on Microtidal Beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 10(2):326, feb 2018. ISSN 2072-4292. doi: 10.3390/rs10020326.
- J. E. Pardo-Pascual, J. Almonacid-Caballer, Luis A. Ruiz, and J. Palomar-Vázquez. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123: 1–11, 2012. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2012.02.024.
- R. Pérez Campaña and L. M. Valenzuela Montes. Agro-urban open space as a component of agricultural multifunctionality. *Journal of Land Use Science*, 9(1):82–104, 2014. ISSN 1747423X. doi: 10.1080/1747423X.2012.751561.
- G. P. Petropoulos, D. P. Kalivas, H. M. Griffiths, and P. P. Dimou. Remote sensing and GIS analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two Mediterranean river deltas: The case of the Axios and Aliakmonas rivers, Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35(PB):217–228, 2015. ISSN 1872826X. doi: 10.1016/j.jag.2014.08.004.
- R. Pimentel, J. Herrero, and M.J. Polo. Graphic User Interface To Preprocess Landsat TM, ETM+ And OLI Images For Hydrological Applications. 2014. URL [http://academicworks.cuny.edu/cc\[_\]conf\[_\]hic/310/](http://academicworks.cuny.edu/cc[_]conf[_]hic/310/).
- R. Pimentel, J. Herrero, and M.J. Polo. Snow evolution in a semi-arid mountainous area combining snow modelling and Landsat spectral mixture analysis. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 368(May):33–39, 2015. ISSN 01447815. doi: 10.5194/piahs-368-33-2015.
- R. Pimentel, J. Herrero, and M. J. Polo. Quantifying snow cover distribution in semiarid regions combining satellite and terrestrial imagery. *Remote Sensing*, 9(10):1–17, 2017. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs9100995.
- A. V. Prishchepov, V. C. Radeloff, M. Dubinin, and C. Alcantara. The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe. *Remote Sensing of Environment*, 126: 195–209, 2012. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2012.08.017.
- A. Pulido Bosch, G. Morales, and J. Benavente. Hidrogeología del delta del río Adra. *Estudios Geológicos*, 44:429–443, 1988.

- Z. Qu and L. Zhang. Research on image segmentation based on the improved Otsu algorithm. *Proceedings - 2010 2nd International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2010*, 2:228–231, 2010. doi: 10.1109/IHMSC.2010.157.
- E. Quevedo, A. Baquerizo, M. A. Losada, and M. Ortega-Sánchez. Large-scale coastal features generated by atmospheric pulses and associated edge waves. *Marine Geology*, 247(3-4):226–236, 2008. ISSN 00253227. doi: 10.1016/j.margeo.2007.10.005.
- R. Ranasinghe, C. S. Wu, J. Conallin, T. M. Duong, and E. J. Anthony. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on fluvial sediment supply to the coast by the world’s large rivers: Pearl River Basin, China. *Scientific Reports*, 9(1):1–10, 2019. ISSN 20452322. doi: 10.1038/s41598-019-45442-2.
- A. Rasuly, R. Naghdifar, and M. Rasoli. Monitoring of Caspian Sea coastline changes using object-oriented techniques. *Procedia Environmental Sciences*, 2(5):416–426, 2010. ISSN 18780296. doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.046. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.046>.
- J. D. Restrepo and S. A. López. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1):1–21, 2008. ISSN 08959811. doi: 10.1016/j.jsames.2007.09.002.
- M. Roderick, R. Smith, and S. Cridland. The precision of the NDVI derived from AVHRR observations. *Remote Sensing of Environment*, 56(1):57–65, 1996. ISSN 00344257. doi: 10.1016/0034-4257(95)00213-8.
- M. Rodríguez-Rodríguez, J. Benavente, F. J. Alcalá, and M. Paracuellos. Long-term water monitoring in two Mediterranean lagoons as an indicator of land-use changes and intense precipitation events (Adra, Southeastern Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91(3):400–410, 2011. ISSN 02727714. doi: 10.1016/j.ecss.2010.11.003.
- A. S. Rogers and M. S. Kearney. Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12):2317–2335, jun 2004. ISSN 0143-1161. doi: 10.1080/01431160310001618103. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160310001618103>.
- K. Rokni, A. Ahmad, A. Selamat, and S. Hazini. Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5):4173–4189, 2014. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs6054173.
- J. W. Rouse. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect). Technical report, Texas A&M University - Remote Sensing Center, 1973.
- A. Sanchez-Arcilla, J. Jimenez, and H. Valdemoro. The Ebro Delta: Morphodynamics and Vulnerability. *Journal of Coastal Research*, 14(3):755–772, 1998.
- A. Sanchez-Arcilla, J. A. Jiménez, H. I. Valdemoro, and G. Vicenç. Implications of Climatic Change on Spanish Mediterranean Low-Lying Coasts: The Ebro Delta Case. *ournal of Coastal Research*, pages 306–316, 2008. doi: <https://doi.org/10.2112/07A-0005.1>.
- J. C. Sandidge and R. J. Holyer. Coastal bathymetry from hyperspectral observations of water radiance. *Remote Sensing of Environment*, 65:341–352, 1998. ISSN 00344257. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00043-1.
- J. Santillan, M. Makinano, and E. Paringit. Integrated landsat image analysis and hydrologic modeling to detect impacts of 25-year land-cover change on surface runoff in a Philippine watershed. *Remote Sensing*, 3(6):1067–1087, 2011. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs3061067.
- G. Sarp and M. Ozcelik. Water Body Extraction and Change Detection Using Time Series: A Case Study From Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science*, may 2016. ISSN 16583655. doi: 10.1016/j.jtusci.2016.04.005.

- M.L. Schwartz, editor. *Encyclopedia of Coastal Science*. Editorial Springer Science & Business Media, 2005.
- P.S. Sheeja and A.J. Ajay-Gokul. Application of Digital Shoreline Analysis System in Coastal Erosion Assessment. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(6):7876–7883, 2016. doi: 10.4010/2016.1848.
- J. A. Sobrino. *Teledetección*. Universitat de València, 2000. ISBN 8437042208. URL <https://books.google.com/books?id=Yb6xIldfoT0C{&}pgis=1>.
- C. Song, C. E. Woodcock, Karen C. Seto, M. P. Lenney, and S.A. Macomber. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2):230–244, 2001. ISSN 00344257. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00169-3.
- M. Sonwalkar, L. Fang, and D. Sun. Use of NDVI dataset for a GIS based analysis: A sample study of TAR Creek superfund site. *Ecological Informatics*, 5(6):484–491, 2010. ISSN 15749541. doi: 10.1016/j.ecoinf.2010.07.003.
- J. P.M. Syvitski. Deltas at risk. *Sustainability Science*, 3(1):23–32, 2008. ISSN 18624065. doi: 10.1007/s11625-008-0043-3.
- K.K.W. Tang and M. R. Mahmud. Imagery-derived bathymetry in Strait of Johor’s turbid waters using multispectral images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W9):133–137, 2018. ISSN 16821750. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-139-2018.
- J. F. Terrano, J. G. Flocks, and K. E. L. Smith. Analysis of Shoreline and Geomorphic Change for Breton Island , Louisiana , from 1869 to 2014. *USGS*, 2016.
- A. Toimil, I. J. Losada, R. J. Nicholls, R. A. Dalrymple, and M. J.F. Stive. Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review, 2020. ISSN 03783839.
- S. S. Tong, T. L. Pham, K. Gunasekara, T. N. Nguyen, and J. P. Deroin. Monitoring Coastal Morphological Changes Using Remote Sensing and Gis in the Red River Delta Area , Vietnam. *Photo-Interpretation European Journal Of Applied Remote Sensing*, 2(January 2014):51–66, 2014.
- T. E. Townsend. Comparison of Landsat Mss and Tm Imagery for Interpretation of Geologic Structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(9):1245–1249, 1987. ISSN 00991112.
- U.S. Geological Survey. Landsat Missions | , 2016. URL <https://landsat.usgs.gov/>.
- USGS. EarthExplorer. URL <https://www.usgs.gov/earthexplorer-0>.
- USGS. USGS.gov | Science for a changing world, 2016. URL www.usgs.com.
- USGS. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product, 2019. URL <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>.
- USGS National Land Imaging Program. Landsat Collection 1 Level 1. Technical report, 2017. URL <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-collection-1-level-1-product-definition>.
- H. J. Vala and A. Baxi. A Review on Otsu Image Segmentation Algorithm. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 2(2):387–389, 2013. ISSN 2278-1323.
- K. Vani. Satellite Image Processing. In *Fourth International Conference on Signal Processing, Communication and Networking (ICSCN)*. IEEE, 2017. doi: 10.1109/ICSCN.2017.8085410.

- S. M. Vicente-Serrano, F. Pérez-Cabello, and T. Lasanta. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 112(10):3916–3934, 2008. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2008.06.011.
- P. M. Vitousek, H. Mooney, J. Lubchenco, and J. Melillo. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 277(5325): 494–499, 1997. ISSN 00368075. doi: 10.1126/science.277.5325.494.
- F. Vuolo, M. Mattiuzzi, and C. Atzberger. Comparison of the Landsat Surface Reflectance Climate Data Record (CDR) and manually atmospherically corrected data in a semi-arid European study area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42:1–10, 2015. ISSN 1872826X. doi: 10.1016/j.jag.2015.05.003.
- K. White and H. M. El Asmar. Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta. *Geomorphology*, 29(1-2):93–105, 1999. ISSN 0169555X. doi: 10.1016/S0169-555X(99)00008-2.
- L.D. Wright. River Deltas. In R.A. Davis, editor, *Coastal Sedimentary Environments*, page 420. Springer-Verlag New York, 1978. doi: 10.1007/978-1-4684-0056-4.
- H. Xu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14):3025–3033, 2006. ISSN 0143-1161. doi: 10.1080/01431160600589179.
- N. Xu. Detecting coastline change with all available landsat data over 1986-2015: A case study for the state of Texas, USA. *Atmosphere*, 9(3), 2018. ISSN 20734433. doi: 10.3390/atmos9030107.
- N. E. Young, R. S. Anderson, S. M. Chignell, A. G. Vorster, R. Lawrence, and P. H. P.H. Evangelista. A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4):920–932, 2017. ISSN 00129658. doi: 10.1002/ecy.1730.
- K. Yu, C. Hu, and F. E. Muller-karger. Shoreline changes in west-central Florida between 1987 and 2008. *International Journal of remote sensing*, 32(23):8299–8313, 2011. ISSN 0143-1161. doi: 10.1080/01431161.2010.535045.
- F. Yuan, K. E. Sawaya, B. C. Loeffelholz, and M. E. Bauer. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3):317–328, 2005. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2005.08.006.
- Y. Yusuf, M. Matsuoaka, and F. Yamazaki. Damage Detection from Landsat-7 Satellite Images for the 2001 Gujarat, India Earthquake. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 29(November):17–28, 2001. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02989909>.
- C. Zeng, M. Richardson, and D. J. King. The impacts of environmental variables on water reflectance measured using a lightweight unmanned aerial vehicle (UAV)-based spectrometer system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130:217–230, 2017. ISSN 09242716. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.06.004.
- K. Zhai, X. Wu, Y. Qin, and P. Du. Comparison of surface water extraction performances of different classic water indices using OLI and TM imageries in different situations. *Geo-Spatial Information Science*, 18(1):32–42, 2015. ISSN 10095020. doi: 10.1080/10095020.2015.1017911.
- T. Zhang, X. Yang, S. Hu, and F. Su. Extraction of coastline in aquaculture coast from multispectral remote sensing images: Object-based region growing integrating edge detection. *Remote Sensing*, 5(9):4470–4487, 2013. ISSN 20724292. doi: 10.3390/rs5094470.
- X. Zhang and Z. Wang. Coastline Extraction from Remote Sensing Image Based on Improved Minimum Filter. In *Second IIT A International Conference on Geoscience and Remote Sensing Coastline*, volume 2, pages 44–47, 2010. ISBN 9781424485154.

- Z. Zhang, G. He, and Xi. Wang. A practical DOS model-based atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 31(11):2837–2852, 2010. doi: 10.1080/01431160903124682.
- Y. Zhou, J. Dong, X. Xiao, T. Xiao, Z. Yang, G. Zhao, Z. Zou, and Y. Qin. Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors. *Water (Switzerland)*, 9(4), 2017. ISSN 20734441. doi: 10.3390/w9040256.
- X. Zhu. Remote sensing monitoring of coastline change in Pearl River estuary. In *22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 2001.
- Z. Zhu. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130(August):370–384, 2017. ISSN 0924-2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>.
- C. Zografos. Flows of sediment, flows of insecurity: Climate change adaptation and the social contract in the Ebro Delta, Catalonia. *Geoforum*, 80:49–60, 2017. ISSN 00167185. doi: 10.1016/j.geoforum.2017.01.004.